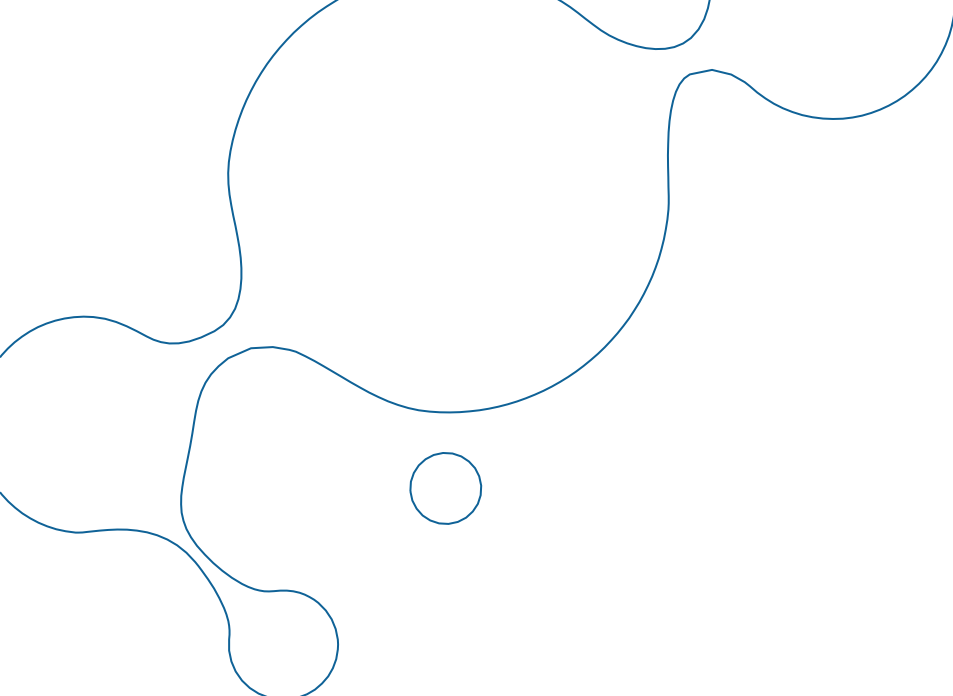


A watercolor illustration featuring a solar panel in the foreground, set against a backdrop of a bright sun and soft, yellowish clouds. The solar panel is mounted on a pole and is surrounded by green grass and small red flowers. The overall style is artistic and eco-friendly.

# **Estado del Arte en Agrivoltaica y su viabilidad en España**

Un estudio de caso de las Islas Baleares

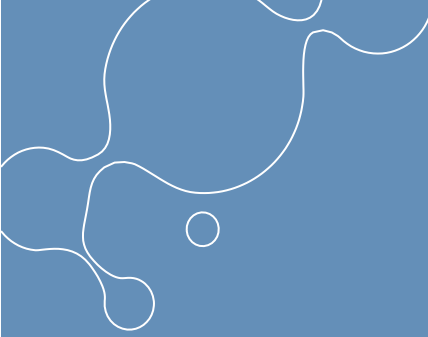


# índice

|        |                                                                                       |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Antecedentes e importancia de la Agrivoltaica.....                                    | 4  |
| 1.1.   | Contexto histórico de la Agrivoltaica .....                                           | 5  |
| 1.2.   | Importancia de integrar agricultura y fotovoltaica .....                              | 6  |
| 1.3.   | Desafíos globales de energía y seguridad alimentaria.....                             | 8  |
| 1.4.   | Relevancia para los objetos de sostenibilidad .....                                   | 11 |
| 2.     | Alcance y estructura del informe.....                                                 | 13 |
| 2.1.   | Objetivos principales .....                                                           | 14 |
| 2.2.   | Cobertura y limitaciones del informe: extra .....                                     | 14 |
| 2.3.   | Acrónimos y términos clave .....                                                      | 15 |
| 3.     | Visión general de la agrivoltaica.....                                                | 16 |
| 3.1.   | Definición y concepto de la agrivoltaica: Definición y principios fundamentales ..... | 17 |
| 3.1.1. | Mecanismo operativo básico .....                                                      | 17 |
| 3.2.   | Historia y desarrollo de los sistemas agrivoltaicos .....                             | 19 |
| 3.3.   | Componentes y tecnologías clave .....                                                 | 20 |
| 3.3.1. | Sistemas montados en PV horizontales.....                                             | 21 |
| 3.3.2. | Sistemas PV verticales .....                                                          | 22 |
| 3.4.   | Beneficios de los Agrivoltaicos.....                                                  | 24 |
| 3.4.1. | Beneficios agrícolas.....                                                             | 24 |
| 3.4.2. | Beneficios de la producción de energía.....                                           | 25 |

|        |                                                          |    |
|--------|----------------------------------------------------------|----|
| 3.4.3. | Beneficios ambientales y económicos.....                 | 25 |
| 4.     | Estado del Arte de la agrivoltaica .....                 | 28 |
| 4.1.   | Perspectiva global .....                                 | 29 |
| 4.1.1. | Países y proyectos líderes .....                         | 29 |
| 4.1.2. | Avances tecnológicos e innovaciones.....                 | 31 |
| 4.1.3. | Desafíos y limitaciones .....                            | 32 |
| 5.     | Agrivoltaica en España.....                              | 36 |
| 5.1.   | Estado actual y desarrollos.....                         | 37 |
| 5.1.1. | Proyectos e Iniciativas Clave .....                      | 37 |
| 5.1.2. | Políticas y Apoyo Gubernamental.....                     | 38 |
| 5.2.   | Paisaje Agrícola y Energético en España .....            | 40 |
| 5.2.1. | Prácticas Agrícolas y Selección de Cultivos.....         | 40 |
| 5.3.   | Estudios de Caso de España.....                          | 42 |
| 5.3.1. | Implementaciones Exitosas.....                           | 42 |
| 5.3.2. | Lecciones Aprendidas y Mejores Prácticas.....            | 42 |
| 6.     | Viabilidad de la agrivoltaica en las Islas Baleares..... | 44 |
| 6.1.   | Condiciones Geográficas y Climáticas .....               | 45 |
| 6.1.1. | Irradiación Solar y Patrones Meteorológicos.....         | 45 |
| 6.1.2. | Tipos de Suelo y Adecuación Agrícola .....               | 45 |
| 6.2.   | Beneficios y Desafíos Económicos y Sociales .....        | 48 |
| 6.2.1. | Economía Local y Agricultura .....                       | 48 |
| 6.2.2. | Regulaciones Locales .....                               | 51 |
| 6.2.3. | Demanda y Suministro de Energía.....                     | 52 |
| 6.3.   | Análisis DAFO .....                                      | 55 |
| 7.     | Evaluación y recomendaciones.....                        | 57 |
| 7.1.   | Evaluación de Viabilidad .....                           | 58 |
| 7.1.1. | Viabilidad Técnica .....                                 | 58 |
| 7.1.2. | Viabilidad Económica .....                               | 59 |
| 7.1.3. | Impacto Ambiental.....                                   | 60 |
| 7.2.   | Recomendaciones para la Implementación .....             | 60 |
| 7.2.1. | Recomendación de Políticas y Regulaciones .....          | 60 |
| 7.2.2. | Recomendación Tecnológica.....                           | 61 |
| 8.     | Conclusiones .....                                       | 63 |

|    |                  |    |
|----|------------------|----|
| 9. | Referencias..... | 66 |
|----|------------------|----|



## 1. Antecedentes e importancia de la Agrivoltaica

---

## 1.1. Contexto histórico de la Agrivoltaica

La agrivoltaica, de ahora en adelante AV, también conocida como Sistemas Agrivoltaicos (AVS), Agrivoltaicos o compartición solar se refiere, según la norma DIN SPEC 91434:2021-05, al “uso combinado de la misma área de terreno para la producción agrícola como uso primario y para la producción de electricidad fotovoltaica (FV) como uso secundario”. Esto se puede lograr con paneles solares cercanos al suelo o montados en estructuras a varios metros de altura. El concepto fue introducido en 1981 por el Prof. Adolf Goetzberg y el Dr. Armin Zastrow en Sonneenergie [1], demostrando que los cultivos pueden crecer debajo de módulos fotovoltaicos espaciados.

Pasaron unos 20 años hasta que la agrivoltaica ganara impulso. En 2011, el Instituto Nacional de Investigación Agrícola de Francia (INRA) lanzó un importante proyecto piloto cerca de Montpellier, demostrando que la combinación de paneles solares y cultivos mejora la productividad general [2]. También exploraron los beneficios de los sistemas de seguimiento solar.

Como se muestra en la Figura 1, el concepto ha ganado relevancia debido a la necesidad de prácticas sostenibles y energías renovables. Los avances tecnológicos en sistemas fotovoltaicos y el creciente reconocimiento del cambio climático han impulsado el interés y la inversión en AVS a nivel mundial. Hoy en día, la Agrivoltaica se considera una forma prometedora de maximizar la eficiencia del uso del suelo, mejorar los rendimientos agrícolas mediante la gestión del microclima y aumentar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y energéticos. Se implementa en todo el mundo, desde Europa hasta Asia y las Américas, con investigaciones en curso para optimizar y ampliar sus aplicaciones.

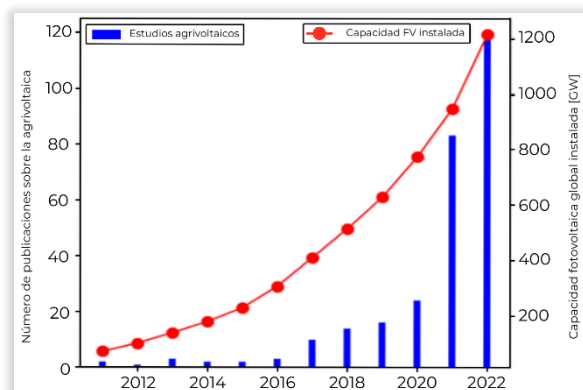


Figura 1. Número de publicaciones relacionadas con la Agrivoltaica con capacidad fotovoltaica instalada global [3].

## 1.2. Importancia de integrar agricultura y fotovoltaica

El punto clave de los AVS es el uso dual del terreno para energía y agricultura, lo que potencialmente puede aumentar la productividad de la tierra en casi un 90%. Si los rendimientos agrícolas y fotovoltaicos no caen por debajo del 50% en promedio, los AVS superan a los sistemas separados. Como se muestra en la Figura 3, incluso con una reducción en el rendimiento agrícola, los AVS generan energía renovable, produciendo hasta un 50% más de energía que las turbinas eólicas gracias a un factor de capacidad más alto, y pueden ahorrar hasta un 20% de agua para riego [3]. Esto aporta beneficios económicos al diversificar los ingresos de los agricultores a través de la venta de electricidad, mejorando la resiliencia económica de las explotaciones agrícolas y reduciendo la dependencia de la red.

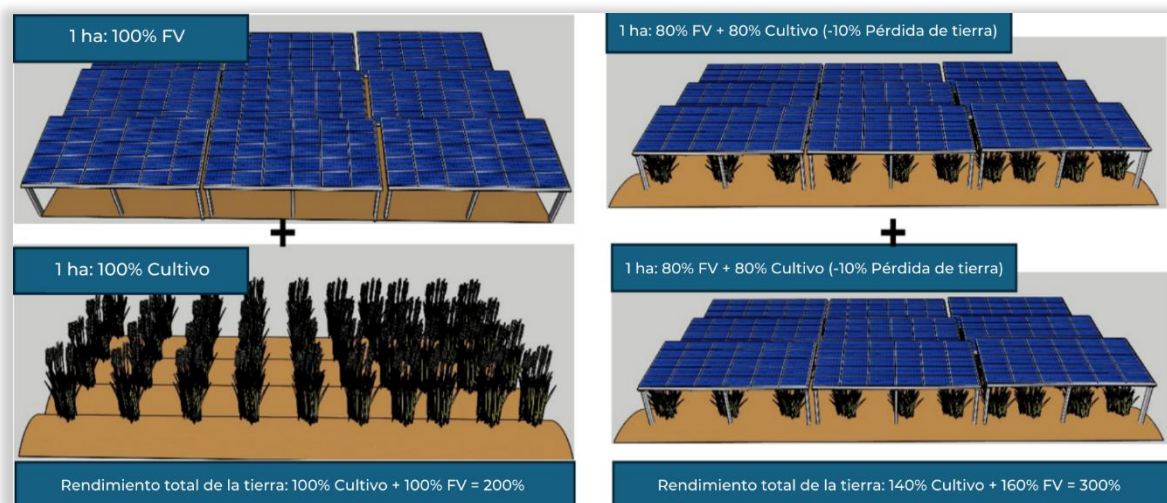


Figura 2. Ejemplo del concepto Agrivoltaica [4].

Los AVS desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático al producir energía renovable, mejorar la captura de carbono, reducir el uso de agua y prevenir la erosión del suelo [5]. Además, crean microclimas que apoyan la biodiversidad. Los AVS pueden ayudar a los países a cumplir con los objetivos de energía renovable, garantizar la seguridad alimentaria y promover la gestión sostenible de la tierra. Para las comunidades locales, la adopción de la agrivoltaica ofrece oportunidades educativas y de empleo, fomentando una mayor conexión con prácticas y tecnologías sostenibles.

La energía solar generada por los AVS puede ser utilizada de inmediato por los agricultores o comunidades cercanas para riego y otras necesidades, o almacenada en baterías, capacitores o sistemas de

gravedad como torres de agua. Además, es posible la integración con plantas de energía de hidrógeno o instalaciones de desalinización, ya que las conexiones directas a la red pueden ser costosas e ineficientes, especialmente para sitios remotos debido a las largas conexiones de cables. Aunque el mantenimiento de los paneles solares es necesario, genera empleos en el sector de la energía renovable, beneficiando a las comunidades locales.

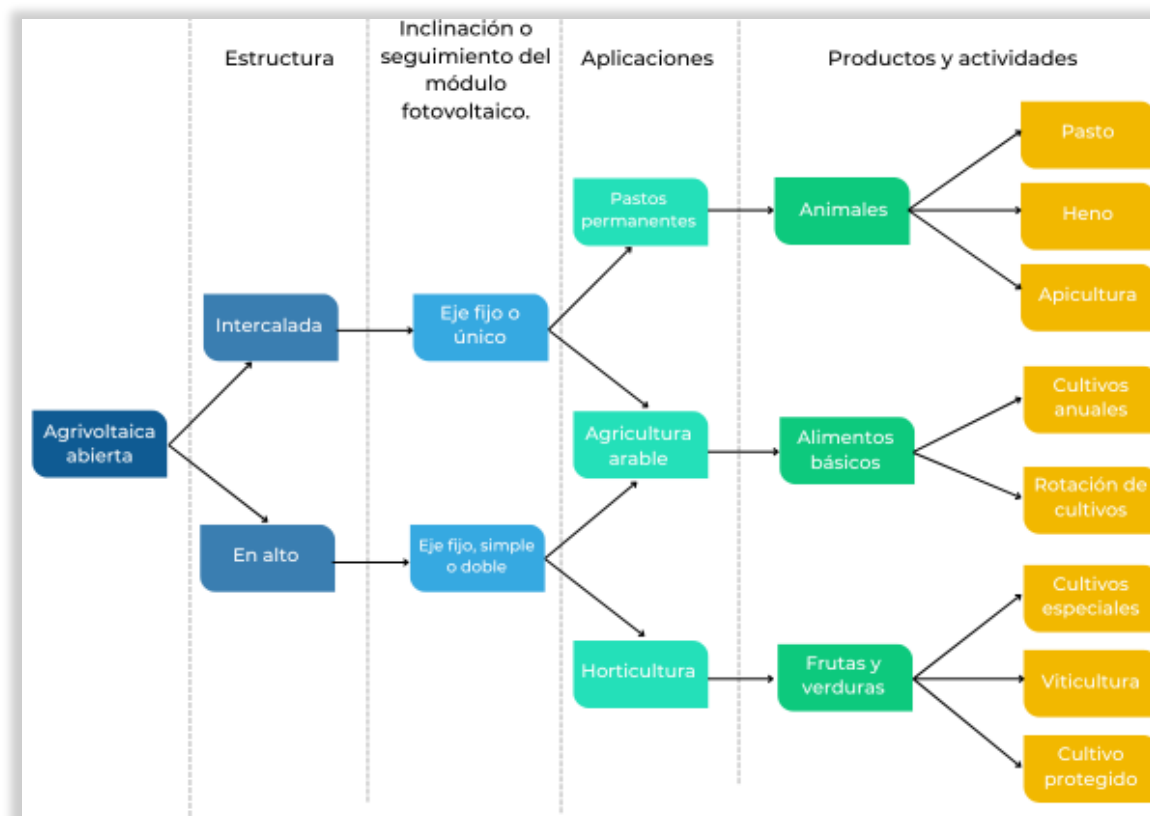


Figura 3. Clasificación típica de sistemas agrivoltaicos abiertos.

Como se ilustra en la Figura 3, los AVS pueden clasificarse en dos grandes tipologías según su estructura: intercalados entre los cultivos o en alto (también denominados sistemas *overhead*). Ambas categorías presentan variaciones adicionales en la inclinación de los módulos fotovoltaicos, el uso de seguimiento solar, las aplicaciones y los tipos de cultivos que soportan. Aunque la agrivoltaica también se ha experimentado en espacios cerrados, como invernaderos, o en ámbitos como la acuicultura, estas aplicaciones son todavía incipientes y no siempre encajan en la definición estricta del concepto. En el presente informe se prestará atención a los AVS abiertos, los cuales se aplican en diferentes prácticas agrícolas —desde horticultura hasta ganadería y cultivos en tierras arables— y requieren adaptaciones específicas según las características del terreno y del

producto. Esta clasificación constituye, por tanto, una guía general para comprender los principales tipos de AVS y sus posibles usos.

### 1.3. Desafíos globales de energía y seguridad alimentaria

La necesidad de la agrivoltaica surge de la competencia por la tierra entre los sectores agrícola y energético, entre otros. La invasión de Rusia a Ucrania ha interrumpido significativamente las cadenas de suministro alimentario globales, causando un fuerte aumento en los precios de los alimentos y del petróleo. Según el Programa Mundial de Alimentos (PMA), debido a razones acumulativas, más de 258 millones de personas en 58 países experimentaron niveles elevados de inseguridad alimentaria aguda, con 42 identificados como crisis alimentarias importantes. Además, en 2022, se encontró que los shocks económicos derivados de la COVID-19 y los conflictos en Ucrania y el Medio Oriente fueron los principales impulsores de un aumento del 34% en la inseguridad alimentaria aguda [6].

Con todos estos conflictos e incertidumbres, los precios de la energía también han aumentado, afectando las cadenas de suministro alimentario a través del aumento de las facturas de energía y el encarecimiento de los fertilizantes. Combinado con sequías y tormentas inducidas por el cambio climático, el aumento de los precios de las materias primas alimentarias en 2021 empujó a aproximadamente 54 millones de personas en países de bajos ingresos hacia la inseguridad alimentaria [7].

Según el Grupo del Banco Mundial, la inflación de precios de alimentos nacionales supera el 5% en casi el 60% de los países de bajos ingresos y en el 63% de los países de ingresos bajos y medios, superando la inflación general en casi la mitad de los 167 países encuestados [8]. Esto plantea un problema significativo, ya que intensifica la inseguridad alimentaria y aumenta el costo de vida para las poblaciones vulnerables, lo que agrava aún más su estabilidad económica. Informes del Programa Mundial de Alimentos (PMA) y del Grupo del Banco Mundial enfatizan la necesidad crítica de mejorar la resiliencia en la producción de alimentos, con el grupo de reflexión Chatham House pronosticando un déficit de 573 millones de hectáreas de tierras cultivables para 2050, a menos que se implementen reformas sustanciales en las prácticas agrícolas o los hábitos alimentarios [9]. Este creciente desafío se agrava por el hecho de que la irrigación consume actualmente aproximadamente el 70% de los recursos

hídricos globales, destacando la naturaleza insostenible de los métodos agrícolas tradicionales.

La agrivoltaica, al integrar la producción de energía solar con actividades agrícolas, presenta una solución prometedora a este problema, ya que, como podemos observar en la Figura 4, hay una abundancia de tierras agrícolas que se pueden desarrollar en AVS. Este enfoque innovador no solo optimiza el uso de la tierra, sino que también reduce el consumo de agua y mejora los rendimientos de los cultivos, abordando así tanto la seguridad alimentaria como las preocupaciones de sostenibilidad. Al aprovechar la tecnología de uso combinado, la agrivoltaica puede ayudar a mitigar los efectos adversos del aumento de los precios de los alimentos y la escasez de recursos, proporcionando un camino más resiliente y eficiente hacia la producción alimentaria futura.

La Unión Europea se esfuerza por lograr emisiones netas de carbono cero y una mayor utilización de energías renovables para solidificar sus fuentes energéticas, lo que ha llevado a establecer el objetivo de generar el 45% de la energía a partir de fuentes renovables para 2030 [10]. Estos sistemas podrían desempeñar un papel crucial en la resolución de los conflictos de uso de la tierra al proporcionar energía, alimentos y reducir el uso de agua. Según el informe de Chatham House, satisfacer las necesidades globales de energía solar requeriría entre el 0.5% y el 1% de la superficie terrestre global. El Instituto Fraunhofer estima que la capacidad instalada de energía fotovoltaica (PV) en Alemania debe aumentar de seis a ocho veces para 2045 con el fin de lograr la neutralidad climática, mientras que en los territorios no peninsulares de España se espera que se descarbonicen al 100% para 2040, debido a su tamaño reducido y clima favorable, que son muy adecuados para el despliegue de energías renovables como la solar, junto con una flota de transporte eléctrico y un sistema de transporte público optimizado [11].

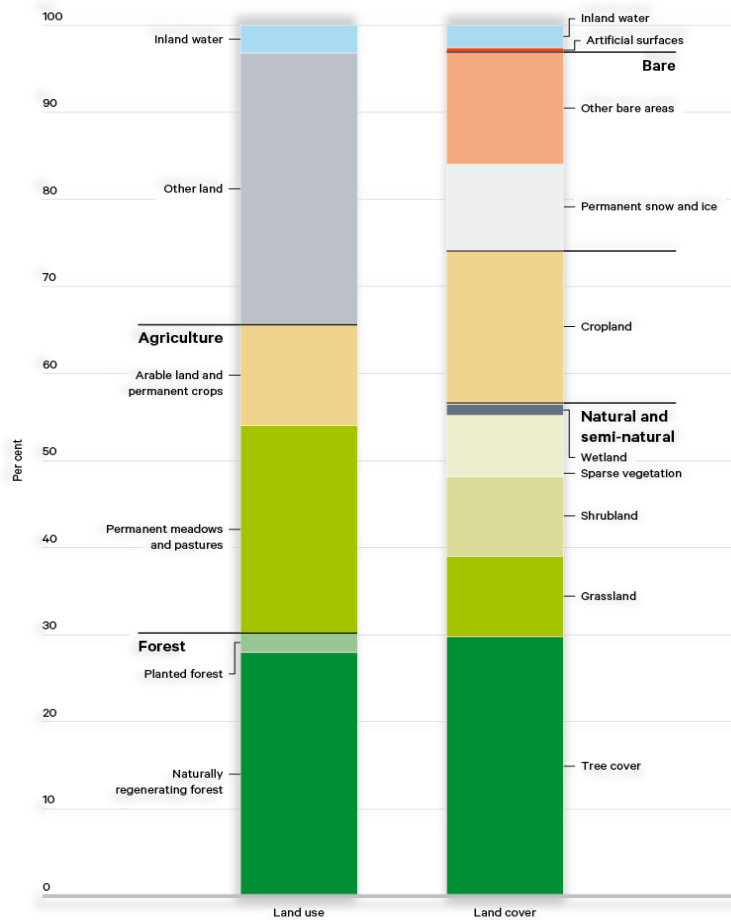


Figura 4. Clasificaciones de uso y cobertura del suelo [7].

La producción de alimentos y energía renovable son prioridades principales para la mayoría de los gobiernos, y la agrivoltaica parece ser un componente clave de la solución, como lo demuestra el aumento exponencial de investigaciones y proyectos financiados por el gobierno relacionados con este sector, tal como se observa en la Figura 6.

## 1.4. Relevancia para los objetos de sostenibilidad

La agrivoltaica contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de varias maneras:



Reducción de los costos de la agricultura y electrificación de comunidades rurales.



Apoyo a la productividad agrícola y recuperación de tierras.



Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y provisión de sombra para ganado y agricultores.



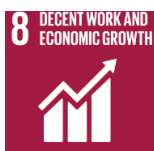
Creación de empleos en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) y energías renovables.



Promoción del uso eficiente de los recursos hídricos.



Generación de energía renovable y apoyo a otras fuentes, por ejemplo, energizando máquinas de desalación para la generación de hidrógeno verde.



Creación de empleos en energías renovables y agricultura, así como fomento del desarrollo económico.



Desarrollo de infraestructuras agrícolas sostenibles.



Provisión de oportunidades equitativas para que los agricultores compitan con el aumento de los precios de la electricidad y el petróleo.



Integración en la planificación urbana y creación de comunidades holísticas.



Promoción de prácticas sostenibles y reducción de la huella de carbono de los alimentos.



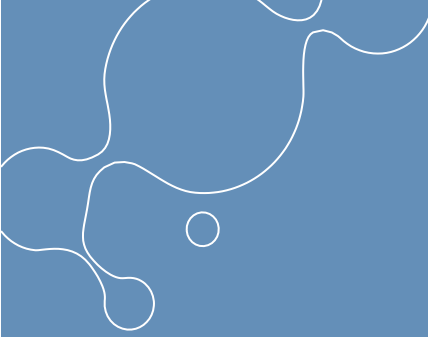
Reducción de las emisiones de carbono del sector primario.



Potencial para ser utilizado en acuicultura.



Promoción de colaboraciones entre múltiples partes interesadas para el desarrollo sostenible.



## 2. Alcance y estructura del informe

---

## 2.1. Objetivos principales

Este informe tiene como propósito principal analizar la viabilidad de los sistemas agrivoltaicos (AVS) en España, con especial atención a su posible implantación en las Islas Baleares. Para ello, se establece el siguiente objetivo principal (OP) y los sucesivos objetivos específicos (OE):

|             |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>OP</b>   | Evaluar el estado actual del desarrollo tecnológico, económico y normativo de la agrivoltaica, y valorar su aplicación práctica en el contexto insular balear.                                                                                              |
| <b>OE 1</b> | Resumir este estado, recopilando información sobre su origen, evolución, componentes tecnológicos, aplicaciones y beneficios, tanto a nivel global como nacional.                                                                                           |
| <b>OE 2</b> | Evaluar el potencial de la agrivoltaica en España y en las Islas Baleares, considerando factores geográficos, climáticos, económicos y regulatorios que influyen en su implementación.                                                                      |
| <b>OE 3</b> | Identificar y destacar los principales obstáculos que enfrenta actualmente la agrivoltaica, incluyendo limitaciones técnicas, barreras normativas, viabilidad económica, y la falta de conocimiento o integración entre los sectores agrícola y energético. |

Este enfoque responde a la pregunta de investigación central: **¿Son aptos los AVS para su implantación en las Islas Baleares?**

## 2.2. Cobertura y limitaciones del informe: extra

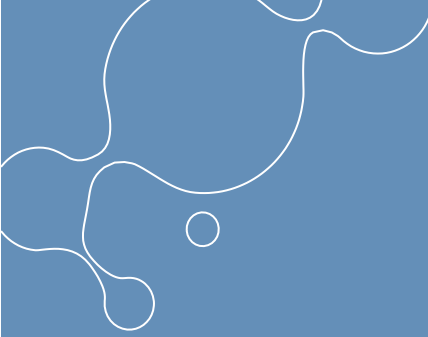
Este informe ha sido elaborado por el Clúster de Transición Ecológica de las Illes Balears (Clúster TEIB), que ha solicitado financiación para desarrollar, junto con la Universitat de les Illes Balears (UIB), un proyecto de investigación sobre la viabilidad del uso de sistemas agrivoltaicos (AVS) en Mallorca y en el conjunto de las Baleares. El documento se basa exclusivamente en investigación académica y se desarrolla con un enfoque neutral y objetivo.

## 2.3. Acrónimos y términos clave

Para facilitar la comprensión del informe, a continuación se presenta una tabla con los acrónimos y siglas más utilizados a lo largo del documento, junto con su significado completo. Esta sección tiene como objetivo servir de referencia rápida para el lector, dado que muchos conceptos técnicos relacionados con la agrivoltaica, la energía fotovoltaica y las políticas de sostenibilidad se expresan mediante abreviaturas comúnmente empleadas en el ámbito académico y técnico.

| Acrónimo | Significado                                                                              |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| AEMET    | Agencia Estatal de Meteorología                                                          |
| AV / AVS | Agrivoltaica / Sistemas Agrivoltaicos                                                    |
| CPV      | Concentrador Fotovoltaico                                                                |
| CTAEX    | Centro Tecnológico Agroalimentario de Extremadura                                        |
| DSSC     | Dye Sensitized Solar Collectors                                                          |
| EIA      | Evaluación del Impacto Ambiental                                                         |
| ESYRCE   | Encuesta sobre Superficies y Rendimientos                                                |
| GAV      | Gross Added Value (Valor agregado bruto)                                                 |
| GCR      | Ground Coverage Ratio (Relación de cobertura suelo)                                      |
| GHG      | Green House Gas (Gas de efecto invernadero)                                              |
| GWp      | Pico de Gigavatios                                                                       |
| IDAE     | Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía                                 |
| LCOE     | Levelized Cost of Energy (Coste nivelado de energía)                                     |
| LER      | Land Equivalent Ratio (Relación equivalente de tierra)                                   |
| LL       | Land Loss (Pérdida de tierra)                                                            |
| MITECO   | Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico                            |
| MTBF     | Mean Time Between Failure (Tiempo medio entre fallos)                                    |
| NZE      | Net Zero Emissions (Cero Emisiones Netas)                                                |
| OPV      | Organic Photovoltaics (Fotovoltaica orgánica)                                            |
| PAR      | Photosynthetically Active Radiation (400-700nm)<br>(Radiación fotosintéticamente activa) |
| PEAC     | Plan Estratégico de la Alimentación de Cataluña                                          |
| PV       | Photovoltaic (Fotovoltaica)                                                              |
| SDGs     | Sustainable Development Goals (Objetivos de desarrollo sostenible)                       |
| UAA      | Área Agrícola Utilizada                                                                  |

Tabla 1. Acrónimos.



### 3. Visión general de la agrivoltaica

---

### 3.1. Definición y concepto de la agrivoltaica: Definición y principios fundamentales

#### 3.1.1. Mecanismo operativo básico

Los AVS utilizan la tierra tanto para la agricultura como para la producción fotovoltaica. Los paneles solares se colocan típicamente a 2-5 metros sobre los cultivos en estructuras de dosel, ya sea con un ángulo de inclinación óptimo de 20-25° para Europa [12] o con sistemas de seguimiento solar mejorados por inteligencia artificial que optimizan tanto el rendimiento de los cultivos como el de la energía solar. Estos sistemas de seguimiento solar pueden ser de un solo eje (orientados de norte a sur) o de doble eje (norte-sur y este-oeste), siendo estos últimos más costosos. Los paneles solares bifaciales, que generan un 20% más de energía, son los más eficientes para los AVS [13], especialmente cuando se combinan con cultivos resistentes a la sombra como verduras de hoja y hortalizas de raíz, ya que los cultivos y el suelo reflejan parte de la luz solar de nuevo hacia el panel.

Como podemos observar en la Figura 5, existen diversas maneras de establecer un sistema agrivoltaico abierto. La investigación actual y las tendencias están explorando la eficiencia y el uso de sistemas fotovoltaicos en overhead, especialmente utilizando seguidores de un solo y doble eje.

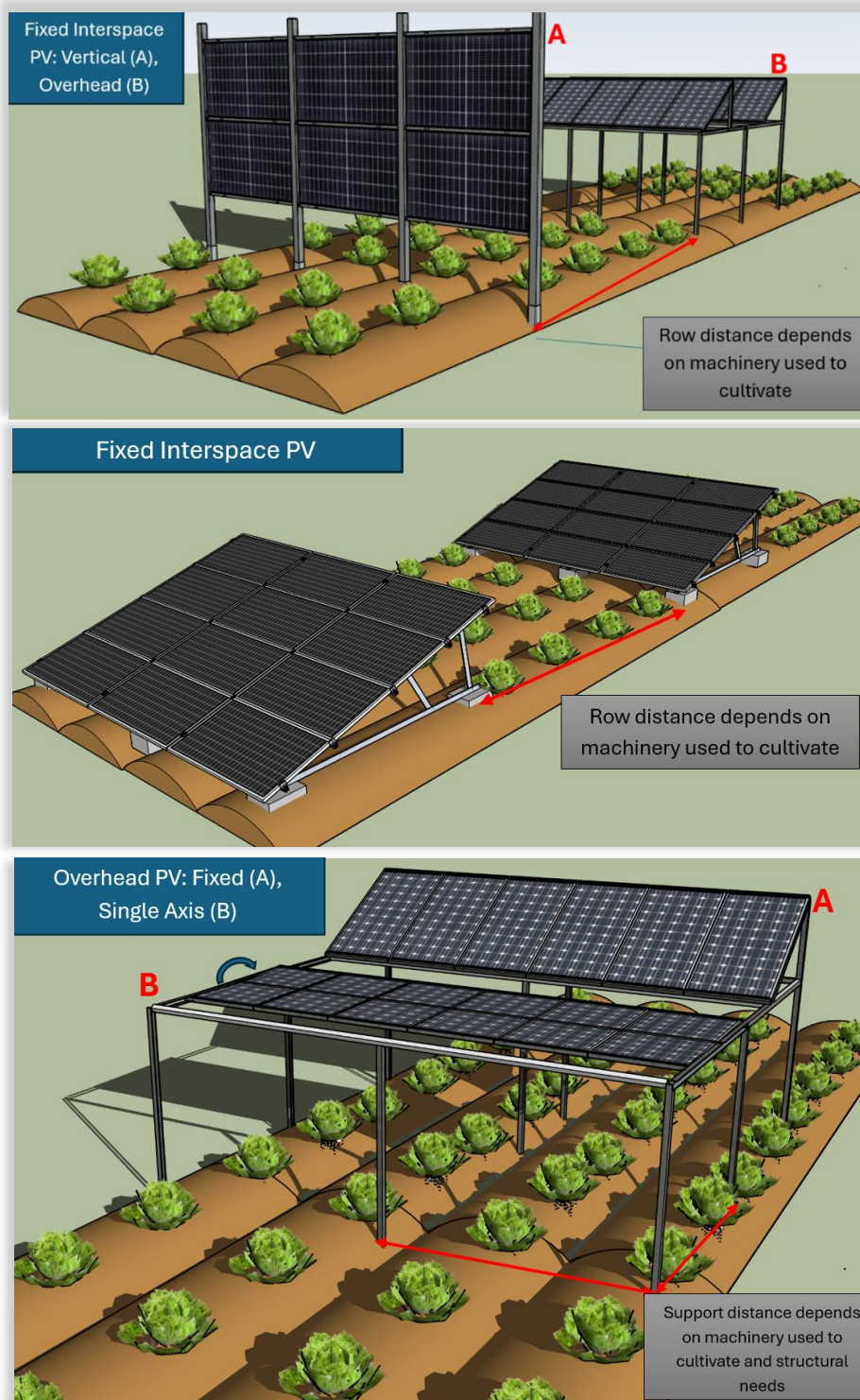


Figura 5. Configuraciones agrivoltaicas abiertas.

En los sistemas fotovoltaicos *overhead*, los canopies están fijados al suelo con un sistema de raíces de árbol que utiliza varillas de acero roscadas para asegurar la estructura (ver Figura 8), eliminando así la necesidad de cimientos de concreto, que pueden compactar el suelo y complicar la remoción del sistema. Los cultivos se cosechan de la manera habitual, pero se deben tomar precauciones adicionales para

no dañar el dosel, como el uso de parachoques protectores reforzados. Aunque habrá una ligera pérdida de terreno (LL) de entre el 2 y el 8% debido al área que rodea inmediatamente los soportes, el resto de los cultivos puede ser cultivado de manera convencional.

### 3.2. Historia y desarrollo de los sistemas agrivoltaicos

El concepto de los AVS se originó en 1928, pero el primer prototipo surgió en Japón en 2004, liderado por Akira Nagashima [15]. Desde entonces, la práctica ha ganado tracción a nivel mundial bajo diversos nombres como agrivoltaicos, agrofotovoltaicos y compartición solar. Para los fines de este informe, nos referiremos a este concepto como agrivoltaicos.

En Europa, los proyectos agrivoltaicos han experimentado un crecimiento significativo. De un solo proyecto en 2020 (HyPERFarm) [16], ahora hay 13 proyectos en 2023. Con 144 innovadores en el campo, se anticipa que se establecerán más de 200 proyectos en la Unión Europea [17], con España liderando con 29 proyectos y un presupuesto total de la UE de 14 millones de euros [16].

Siguiendo esta tendencia, la capacidad instalada de los AVS ha aumentado exponencialmente, pasando de 5 MWp en 2012 a 14 GWp en 2021. Como podemos observar en la Figura 7, los gobiernos han estado financiando proyectos importantes en Japón (desde 2013), China (desde 2014) y Francia (desde 2017) [14]. Aunque la rentabilidad de estos sistemas depende en gran medida del sitio y varía con los precios de la electricidad, los cultivos y la tierra, se han logrado avances tecnológicos significativos.

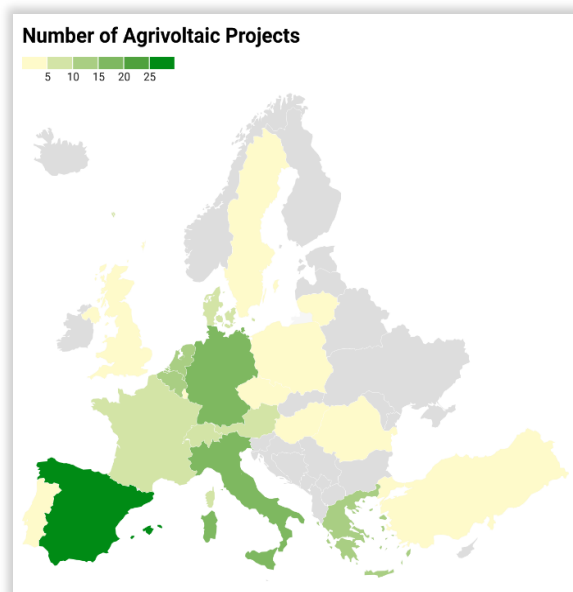


Figura 6. Proyectos agrivoltaicos en Europa, Fuente: Kaila [16].

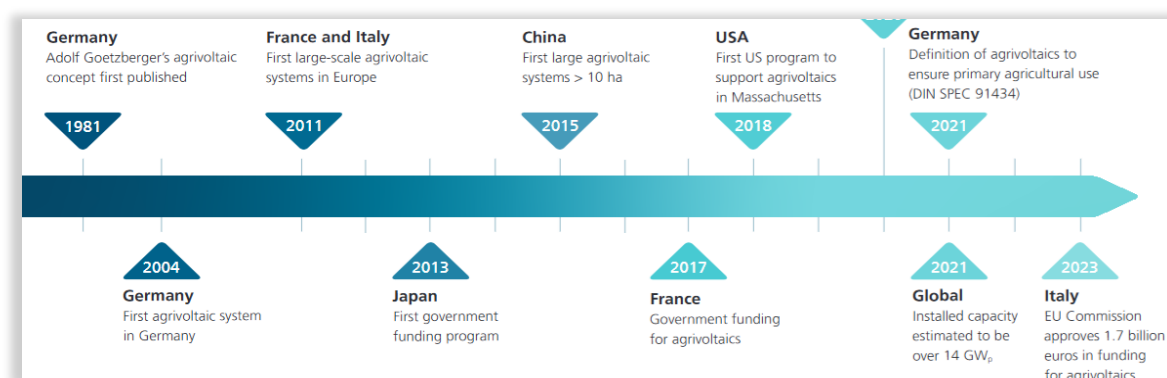


Figura 7. Principales hitos en la evolución global de la agrivoltaica.

En 2021, Alemania adoptó la regulación DIN SPEC 91434 para garantizar el uso adecuado de los AVS, evitando la explotación de subsidios destinados a la agricultura mediante la producción exclusiva de electricidad. Los avances tecnológicos incluyen sistemas de seguimiento solar y ambiental en sistemas fotovoltaicos montados, donde algoritmos entrenados optimizan los rendimientos agrícolas y energéticos. La investigación en curso sobre paneles fotovoltaicos translúcidos, orgánicos y selectivos tiene el potencial de mejorar aún más la viabilidad de los agrivoltaicos, lo cual se discutirá en la sección 5.1.

### 3.3. Componentes y tecnologías clave

Como se puede observar en la Figura 5, hay numerosas maneras de implementar AVS. Se ha acordado implícitamente que, cuando sea posible, las fundaciones deben evitar el uso de concreto, ya que esto compactaría el suelo y haría que el sistema sea más difícil de retirar. En su lugar, las canopies pueden asegurarse utilizando el principio de raíces de árboles, donde se atornillan varillas de acero roscadas en una placa circular de tierra a longitudes que dependen de la altura de los paneles y de la velocidad del viento esperada en la zona [3].

Cuando se trata de la instalación de AVS, hay dos formas principales de implementarlos:



Figura 8. Tipos de montaje; método de raíces de árboles (izquierda), con topes (derecha) Fraunhofer ISE y Spinnanker GmbH.

### 3.3.1. Sistemas montados en PV horizontales

En estos sistemas, los paneles fotovoltaicos se colocan sobre canopies elevadas, idealmente a 3 a 4 metros sobre el suelo [13]. Esta altura permite que la maquinaria agrícola opere por debajo mientras minimiza la sombra sobre las plantas. Típicamente, ocupan aproximadamente el 2% de la tierra con pilares y estructuras de montaje [3]; esta pérdida de terreno puede variar con la adición de parachoques de protección para evitar daños causados por la maquinaria. Estas estructuras suelen representar el mayor porcentaje del costo y de las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema. Dentro de esta categoría, existen dos tipos:

**Estacionarios:** Los paneles están fijos en un ángulo de inclinación específico, lo que resulta rentable, pero puede generar sombra desigual en el área inferior y requerir sistemas de gestión del agua integrados para mitigar la erosión del suelo inducida por la lluvia.

**Seguimiento solar:** Utilizando sensores y algoritmos, estos sistemas emplean seguimiento de uno o dos ejes para optimizar tanto los rendimientos agrícolas como los solares. Los rastreadores de dos ejes, aunque son los más costosos, proporcionan la mayor homogeneidad de luz y la menor reducción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) [4]. Esta flexibilidad también ayuda en condiciones climáticas extremas y facilita el mantenimiento y el paso de maquinaria.



Figura 10. Estructura de seguimiento solar fotovoltaica.



Figura 9. Estructura estacionaria fotovoltaica.

### 3.3.2. Sistemas PV verticales

Los sistemas PV verticales presentan paneles PV bifaciales dispuestos en una estructura similar a una pared a lo largo de filas de cultivos o cercas para el ganado. Esta configuración es rentable de instalar y mantener. Sin embargo, debido a la orientación de los paneles, produce menos electricidad en comparación con los sistemas horizontales. Aun así, ocupa un espacio mínimo y tiene un impacto visual menor, lo que lo hace versátil y adecuado para diversas aplicaciones.

Estos dos sistemas pueden implementarse ya sea en *overhead*, donde los paneles fotovoltaicos están directamente sobre los cultivos, o interespaciados, donde los paneles fotovoltaicos se colocan en filas entre los cultivos. Esta flexibilidad en el diseño permite una optimización del uso del suelo, garantizando que las actividades agrícolas y de producción de energía se realicen de manera eficiente y sostenible.



Figura 11. Sistema de eje único en Francia © Sun Agri.

Los paneles solares bifaciales son actualmente la opción más eficaz para los AVS, produciendo hasta un 20% más de electricidad que los paneles solares monofaciales tradicionales debido a la reflexión de la radiación por parte de los cultivos y el suelo [13]. Este efecto es especialmente notable con cultivos como las verduras de hoja, que reflejan más luz. En Europa, la investigación indica que estos paneles deben instalarse con una inclinación de 20 a 25 grados para optimizar la producción de energía [12], al mismo tiempo que minimizan la acumulación de polvo proveniente de las actividades agrícolas, un problema significativo en regiones semiáridas y áridas, donde los AVS tienen el mayor potencial. Algunos estudios estiman que los AVS pueden tener una vida útil de aproximadamente 25 años, con una eficiencia inicial del panel solar del 19% y una tasa de degradación anual del 0.3% [18].

En un estudio reciente realizado en India, se encontró que el Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) de los AVS es de 40.21 años, en comparación con 32.31 años para paneles monofaciales y 31.81 años para paneles bifaciales instalados en techos [19]. Esto sugiere que los AVS pueden ser muy fiables y extender la vida útil de los paneles fotovoltaicos en comparación con los instalados en techos. Sin embargo, esto también indica que aún queda mucha investigación por hacer en el ámbito de los AVS, incluida la duración de su vida útil y su finalización.

#### 3.3.2.1. Métodos de Integración Agrícola

Se ha explorado una amplia gama de cultivos y rotaciones de cultivos para los AVS, como se puede observar en la Figura 11. Dada la diversidad de sitios y cultivos, es esencial realizar un estudio local exhaustivo antes de implementar un sistema AVS. De la investigación existente, parece que los sistemas AVS muestran una mejor integración en la viticultura y en entornos similares, donde la infraestructura de protección de cultivos existente facilita una implementación y aceptación más fáciles. Esta es la razón por la que hay muchos proyectos de este tipo en Francia, España e Italia.

En un sentido similar, los sistemas AVS también son beneficiosos para los cultivos perennes, ya que reducen la interacción de la maquinaria con los paneles fotovoltaicos. Para la agricultura de cultivos anuales, las consideraciones incluyen la altura de la maquinaria durante la siembra y la cosecha, así como la tolerancia a la sombra de los cultivos, especialmente en las rotaciones. La altura y densidad de los paneles deben ajustarse en consecuencia, potencialmente especializándose en función de las alturas de los cultivos o, por el contrario,

seleccionando los cultivos en función de la densidad y altura de los paneles solares. Los AVS se han encontrado más efectivos en granjas de pequeña a mediana escala [14].

### 3.4. Beneficios de los Agrivoltaicos

#### 3.4.1. Beneficios agrícolas

Los cultivos cultivados en grandes filas sin la necesidad de maquinaria extensiva, particularmente variedades tolerantes a la sombra como lechuga, frutas de hueso, bayas, ajo y espárragos, muestran un rendimiento notablemente mejor en los AVS [14]. Uno de los beneficios significativos de la agrivoltaica es el establecimiento de un microclima bajo los paneles fotovoltaicos, que puede reducir las temperaturas del suelo entre 2 y 5 °C y disminuir la evaporación debido a la sombra. Este entorno controlado puede apoyar especies vegetales que de otro modo no prosperarían en la zona, ayudando en los esfuerzos de reforestación de desiertos. Aunque hay cierta pérdida de terreno cerca de las estructuras de soporte, se pueden plantar estratégicamente plantas perennes o polinizadoras para mejorar la biodiversidad del ecosistema.

Los AVS demuestran ahorros significativos de agua, con algunas regiones reportando un aumento del 328% en la eficiencia del agua en comparación con áreas de control sin paneles fotovoltaicos [13]. Estos sistemas pueden incorporar sistemas de drenaje para capturar y almacenar agua de lluvia o utilizar sistemas de goteo para la limpieza de los paneles y el riego de los cultivos. La sombra y la protección proporcionadas por los paneles solares resguardan a las plantas de condiciones climáticas extremas, mejorando la resistencia a la sequía y permitiendo que los AVS superen a los campos de cultivo convencionales durante condiciones climáticas desfavorables. Además, el efecto de sombra puede retrasar los tiempos de cosecha de ciertos cultivos, lo que permite a los agricultores vender sus productos más tarde a precios potencialmente más altos. En general, los paneles solares ofrecen ventajas considerables a las granjas en regiones áridas y semiáridas con abundante luz solar y escasez de agua, alineándose bien con las tendencias agrícolas holísticas, particularmente en prácticas de agricultura orgánica.

### 3.4.2. Beneficios de la producción de energía

El principal atractivo de los AVS radica en su capacidad para utilizar la tierra tanto para la agricultura como para la producción de energía:

- **Capacidad de Doble Uso de la Tierra:** A pesar de requerir entre un 20% y un 40% más de tierra que los sistemas montados en el suelo tradicionales para una producción equivalente de energía [4], estos sistemas aprovechan eficazmente la energía renovable. Los agricultores y las comunidades cercanas pueden beneficiarse principalmente de esta energía mediante el consumo local, lo que mejora la producción de alimentos y alimenta procesos agrícolas como el riego y la maquinaria.
- **Electrificación Rural:** Los AVS facilitan la electrificación rural, reduciendo la dependencia de la red eléctrica. La energía excedente generada puede ser vendida de nuevo a la red, diversificando las fuentes de ingresos de los agricultores.
- **Alto Potencial Energético:** Con un potencial de producción de hasta 0,6 MWp/ha en algunas regiones y una producción de energía un 50% mayor en comparación con la energía eólica debido a los diferentes factores de capacidad [4], los AVS contribuyen significativamente a alcanzar los objetivos de Emisiones Netas Cero (NZE) y promover la independencia de los agricultores.
- **Sinergia con Otras Tecnologías Renovables:** La agrivoltaica puede combinarse con otras fuentes de energía renovable. Investigaciones han demostrado eficiencias de conversión de hidrógeno solar del 15.1% [3], indicando sinergias potenciales entre los AVS y la generación de hidrógeno verde. Esta integración sugiere posibles aplicaciones en iniciativas como el programa de Energía Limpia para las Islas de la UE [20]. Además, emparejar los AVS con tecnologías de desalación puede reducir el desperdicio de energía hasta en un 67% [4] en comparación con otros sistemas de almacenamiento o conversión de energía.

### 3.4.3. Beneficios ambientales y económicos

Los AVS también ofrecen varias ventajas económicas y ambientales:

- **Aumento de los Ingresos para los Agricultores:** Los agricultores pueden experimentar un aumento de ingresos superior al 30% si seleccionan cultivos compatibles para los AVS [12].

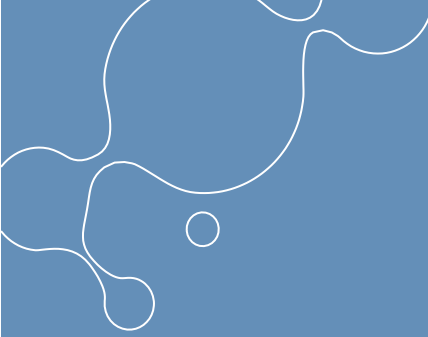
- **Creación de Empleo:** La implementación de AVS requiere mano de obra para la instalación y mantenimiento, creando así oportunidades laborales en comunidades rurales y mejorando la viabilidad económica general.
- **Mejora del Bienestar Animal:** Los AVS también pueden adaptarse para el ganado, proporcionando sombra que mejora la salud de las vacas lecheras y reduce el estrés térmico [21]. Para los agricultores humanos, la sombra ofrecida por la agrivoltaica resulta particularmente beneficiosa en climas cálidos y secos.
- **Integración Ambiental:** La integración de la producción de energía renovable con hábitats para polinizadores y colmenas puede generar beneficios ambientales significativos.
- **Mitigación del Cambio Climático:** Los AVS muestran un gran potencial para mitigar las fluctuaciones estacionales en los rendimientos agrícolas inducidas por el cambio climático, aumentando potencialmente la productividad global de la tierra en un 35-73% [4]. Mejorados por tecnologías como el seguimiento solar, estos sistemas pueden lograr Ratios de Equivalencia de Tierra (LER) que superan 1.5, optimizando aún más el uso de la tierra.

El Ratio de Equivalencia de Tierra es un métrico crucial para evaluar la eficiencia del uso dual de la tierra en la agrivoltaica. Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$LER = \frac{Y_{Crop,AVS}}{Y_{Crop,Ref}} \times (1 - LL) + \frac{Y_{Electric,AVS}}{Y_{Electric,Ref}} \quad (1)$$

En la Ecuación 1,  $Y_{Crop,AVS}$  es el rendimiento del cultivo, en toneladas por hectárea de tierra utilizada completamente para agrivoltaicos.  $Y_{Crop,Ref}$  es el rendimiento del cultivo, en toneladas por hectárea de tierra utilizada completamente para la actividad agrícola sin AVS.  $LL$  es la Pérdida Útil de Tierra causada por los soportes como un porcentaje de la hectárea, que oscila entre el 2% y el 8%, como se explicó en la sección 2.1. De manera similar,  $Y_{Electric,AVS}$  es la capacidad instalada (en vatios) por hectárea de tierra utilizada completamente para agrivoltaicos y  $Y_{Electric,Ref}$  es la capacidad instalada (en vatios) por hectárea utilizada únicamente para fotovoltaicos (parque solar). Un LER superior a 1 significa que la tierra es más productiva que si se utilizara únicamente para la agricultura o para la producción de

energía solar, y este es uno de los principales métricos utilizados para evaluar la eficiencia de los AVS.



## 4. Estado del Arte de la agrivoltaica

---

## 4.1. Perspectiva global

### 4.1.1. Países y proyectos líderes

El impulso global por los agrivoltaicos ha sido particularmente pronunciado en países con extensas tierras agrícolas, especialmente aquellos cerca del ecuador. En los Estados Unidos, por ejemplo, hay 314 proyectos agrivoltaicos que contribuyen a una capacidad solar de hasta 2.8 GW, utilizados predominantemente en áreas de pastoreo y hábitats para polinizadores [22]. China se ha convertido en un actor significativo con una capacidad de producción de 12 GWp, destacando un parque solar de 1 GW que incluye una plantación de bayas goji a gran escala, marcando la instalación agrivoltaica más grande hasta la fecha [23]. Además, otras naciones asiáticas como Japón y Corea del Sur están invirtiendo activamente en sistemas AVS. Corea del Sur, por ejemplo, tiene como objetivo establecer 100,000 AVS en granjas, no solo para apoyar los fondos de pensiones de los agricultores, sino también para contrarrestar la disminución global de la actividad agrícola, que plantea un desafío significativo en todo el mundo [14].

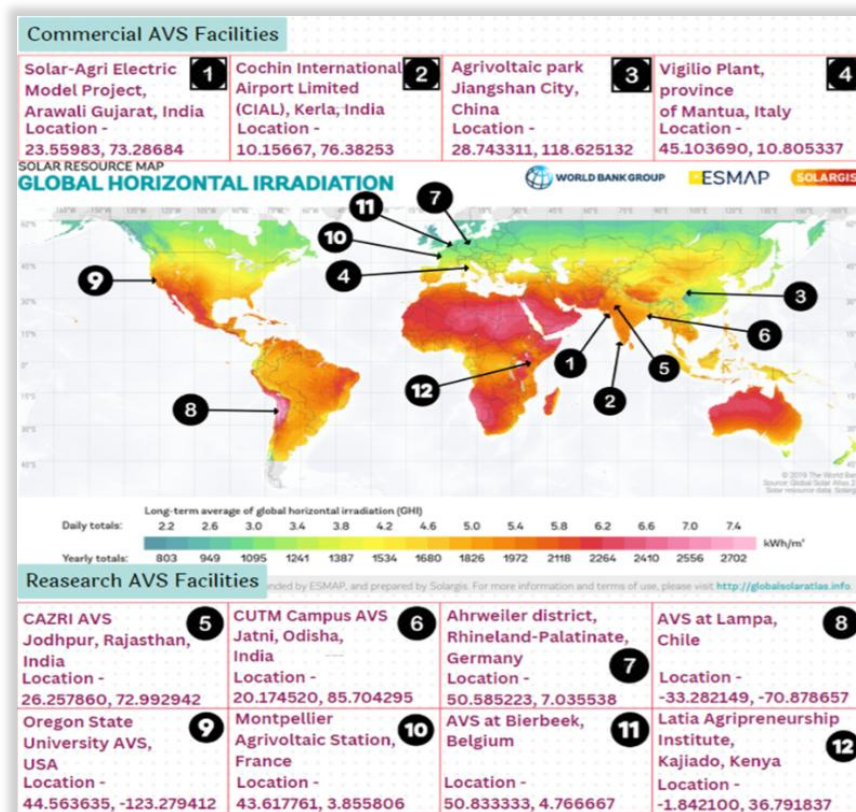


Figura 12. Ubicación de algunas instalaciones AVS comerciales y de investigación [13].

La energía fotovoltaica (PV) se destaca como la tecnología de energía renovable más rentable, con los precios de los módulos fotovoltaicos habiendo caído un 90% desde 2009 hasta 2019, lo que resulta en un costo nivelado de electricidad (LCOE) que oscila entre 4 y 11 centavos por kWh [14].

En Europa, el informe JCR Science for Policy titulado *Visión General del Potencial y Desafíos para la Agri-Fotovoltaica en la Unión Europea*, publicado por la Comisión Europea, resalta el significativo potencial de los Sistemas Agri-Fotovoltaicos (AVS). Cubrir solo el 1% de la Superficie Agrícola Utilizada (UAA) en la UE podría generar 944 GW de electricidad, cinco veces más que la capacidad instalada de la UE en 2022. Incluso cubrir solo el 0.6% de la UAA sería suficiente para cumplir con el objetivo de PV establecido por las Nuevas Tendencias de Políticas NECP de la UE para 2023.

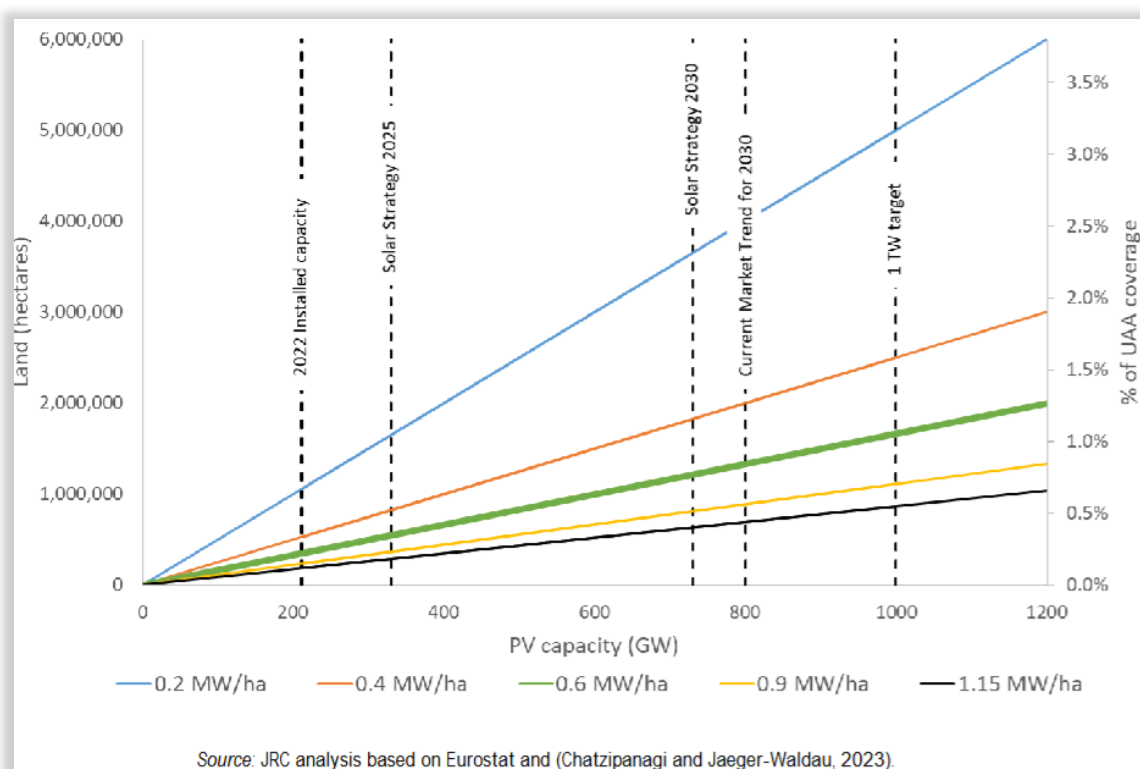


Figura 13. Necesidades de suelo y porcentaje de cobertura de la SAU para AVS para el cumplimiento de los objetivos de la UE.

#### 4.1.2. Avances tecnológicos e innovaciones

El desarrollo de los Sistemas Agrivoltáicos abarca múltiples frentes. Mientras que los impactos biológicos en los cultivos aún se están investigando, existen datos y estudios extensos sobre varios tipos de paneles fotovoltaicos (PV) y configuraciones de PV. Por ejemplo, la Fotovoltaica de Concentración (CPV) exhibe excelentes capacidades de procesamiento espectral y alta eficiencia en la generación de energía concentrada, lo que la hace adecuada para la integración con cultivos. Las tecnologías emergentes como los módulos de PV Orgánico (OPV), con transparencia selectiva por longitud de onda, y las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC), que comparten características con los OPV y son flexibles y ligeras, así como los colectores solares luminiscentes, aún se encuentran en fase de investigación [24]. Estas tecnologías requieren un mayor desarrollo y economías de escala para volverse viables para la implementación de AVS. Sin embargo, el concepto de paneles fotovoltaicos transparentes y selectivos por longitud de onda, que absorben toda la luz excepto la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), que es de 400-700 nm, presenta un gran potencial para los AVS. Además, algunos proyectos han ido aún más lejos y han utilizado sistemas agrivoltáicos para la generación de hidrógeno verde mediante el uso de paneles solares de hidrógeno, como en el proyecto piloto belga desarrollado por HYPERFARM [25].



Figura 14. Instalación agrivoltaica en TRANS Farm [25].

La innovación también se extiende al uso de gemelos digitales y software de modelado en sistemas agrivoltáicos con seguimiento solar. Estas tecnologías emplean extensas redes de sensores para optimizar los rendimientos de los cultivos y la energía. No solo evalúan

la viabilidad de la implementación de AVS basándose en datos de irradiación y clima, sino que también optimizan factores como la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) [26].

Otra rama de la innovación se encuentra en el uso y almacenamiento de la energía proporcionada por el sistema agrivoltáico. Como mencionamos anteriormente, para que el AVS sea sostenible, necesitamos maximizar el autoconsumo de la energía generada; esto significa utilizarla para alimentar los procesos post-cultivo, las cámaras de almacenamiento e incluso incentivar la electrificación de la maquinaria agrícola, que, debido a los altos precios del petróleo, representa un gran costo para cualquier agricultor, especialmente en lugares aislados como las Baleares, donde la importación encarece aún más los costos. En la mayoría de los casos, debido a la naturaleza remota de las granjas, es complicado y costoso conectar el sistema a la red para la descarga, por lo tanto, muchos proyectos están investigando formas de almacenar la energía, desde sistemas de gravedad hasta la producción de hidrógeno verde.

### 4.1.3. Desafíos y limitaciones

#### 4.1.3.1. Desafíos Técnicos

Los sistemas agrivoltáicos enfrentan varios desafíos técnicos que deben abordarse para su adopción generalizada. Una de las preocupaciones clave son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con la producción, instalación y las etapas de fin de vida de estos sistemas. Las estructuras de soporte y los paneles contribuyen significativamente a la huella de GEI en general [18], y aunque estos sistemas están diseñados para una vida útil de 25 años, sus impactos al final de su vida útil siguen siendo inciertos.

Un problema significativo identificado en estudios piloto en Alemania es la falta de tecnologías de almacenamiento de energía eficientes y asequibles. Aunque ha habido investigaciones sobre almacenamiento por gravedad y supercapacitores, no ha surgido ninguna solución única que sea efectiva y rentable. Esto hace que el autoconsumo de la energía generada sea crucial para la viabilidad de los sistemas agrivoltáicos.

Los avances en tecnologías de simulación, como los gemelos digitales de granjas, han mejorado la fiabilidad de los estudios de viabilidad. Sin embargo, aún falta un producto definitivo capaz de optimizar cualquier sistema agrivoltáico. En España, empresas como Endesa están trabajando activamente en el desarrollo de tales soluciones en sus plantas en Sevilla [27].

Otro desafío es el desarrollo de paneles fotovoltaicos ópticamente selectivos y translúcidos, que aún se encuentran en fase de investigación y son actualmente demasiado costosos para implementar. Hay optimismo de que investigaciones adicionales y economías de escala eventualmente harán que estos paneles sean una opción viable, potencialmente resolviendo muchos de los problemas actuales que enfrentan los sistemas agrivoltáicos.

#### 4.1.3.2. Barreras económicas y financieras

El autoconsumo de energía es esencial para la viabilidad económica de los sistemas agrivoltáicos, ya que consumir la electricidad generada a menudo es más rentable que venderla. Aunque el costo nivelado de electricidad (LCOE) para AVS es ligeramente más alto que el de los sistemas montados en el suelo, sigue siendo más competitivo que los sistemas fotovoltaicos en azoteas [4]. Este leve aumento en el LCOE puede compensarse manteniendo una producción agrícola suficiente debajo de los paneles, pero el rendimiento económico de AVS es altamente sensible a los precios de la electricidad, los precios de los cultivos y los rendimientos de los cultivos. Sin embargo, estudios recientes en India han mostrado que los sistemas agrivoltáicos tienen un LCOE de \$0.039/kWh, lo que significa que tienen un tiempo de recuperación más corto y un LCOE más bajo que los sistemas fotovoltaicos similares en azoteas, donde los sistemas agrivoltáicos mostraron una producción de energía un 12.7% mayor y una eficiencia energética un 4.4% superior, ya que el microclima bajo los paneles fotovoltaicos logró reducir la temperatura de los paneles entre 6°C y 8°C [19].

Los agricultores que implementan AVS pueden experimentar un aumento de hasta el 38% en los costos de mantenimiento, que varía según la complejidad del sistema [13]. Los sistemas montados en vertical son los más fáciles de mantener, mientras que los sistemas con seguimiento solar y los horizontales de alta altura requieren un cuidado más intensivo. Además, los agricultores deben seleccionar cuidadosamente los cultivos para cultivar bajo AVS, equilibrando las necesidades de sombreado de diferentes cultivos o ajustando la densidad de PV para adaptarse a los cultivos más sensibles a la sombra en la rotación.

Los desafíos adicionales incluyen posibles reducciones en el rendimiento de los cultivos y retrasos en las temporadas de cosecha, lo que puede interrumpir el flujo de efectivo y la logística [13]. Almacenar y vender cultivos fuera de su período de valor máximo puede reducir significativamente las ganancias de los agricultores. Abordar estos

problemas requiere una planificación cuidadosa y una optimización para garantizar que se cumplan de manera efectiva tanto los objetivos agrícolas como los de producción de energía.

El Centro de Tecnología y Apoyo (TFZ) en Alemania ha destacado barreras económicas y financieras significativas en el desarrollo de plantas de energía agrivoltáicas en comparación con proyectos solares convencionales montados en el suelo. La principal diferencia de costos surge de los gastos más altos en sistemas de seguimiento y requisitos de módulos especializados, como paneles bifaciales o altamente transparentes. Además, los proyectos agrivoltáicos enfrentan costos incrementados durante el proceso de aprobación debido a la necesidad de informes sobre el suelo y el medio ambiente, honorarios legales y restricciones específicas del sitio. Los costos de construcción son aún más elevados para los sistemas de alta elevación para acomodar la maquinaria agrícola y para proyectos que utilizan sistemas de seguimiento.

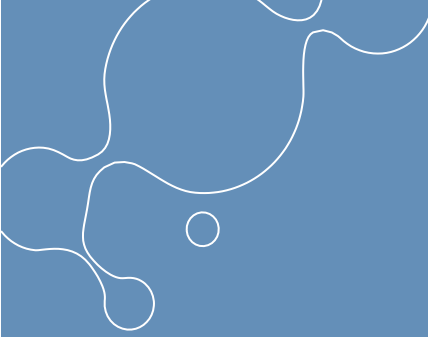
Según un artículo de PV Magazine de marzo de 2021, el costo total estimado para un proyecto agrivoltáico vertical de 345.8 kW en Alemania es de 688 € por kW, con una inversión requerida de 237,760 € por hectárea. Para un sistema agrivoltáico elevado con una capacidad de 650 kW, el costo total es de aproximadamente 1,234 € por kW, y la inversión total es de alrededor de 802,100 € por hectárea. Estos costos están influenciados por las condiciones del sitio, el tipo de sistema fotovoltaico y de montaje utilizado, y los precios de los paneles solares. A pesar de tener costos similares para componentes como cables e inversores, los proyectos agrivoltáicos siguen siendo más caros, principalmente debido a las estructuras de montaje únicas y los requisitos de preparación del sitio. Estos desafíos económicos se agravan por la falta de producción en masa para equipos especializados, lo que lleva a mayores costos por unidad [28].

#### 4.1.3.3. Problemas de Políticas y Regulaciones

Un desafío significativo para los sistemas agrivoltáicos en la UE es la falta de una definición unificada. Aparte de la creación de DIN SPEC 91434:2021-05 en Alemania, no existe un estándar común sobre lo que constituye un AVS. Esta ausencia obstaculiza el desarrollo de políticas y regulaciones coherentes. Los agricultores están particularmente preocupados porque, incluso si conservan más del 80% de su rendimiento agrícola, podrían perder subsidios agrícolas para la tierra [14]. Además, a pesar de producir una cantidad sustancial de energía solar, en Alemania no son elegibles para compensaciones bajo la Ley

de Fuentes de Energía Renovable por suministrar exceso de energía a la red [29].

Otro problema es el arrendamiento masivo de tierras a proveedores de energía a precios más altos, lo que desalienta la agricultura tradicional e incentiva la producción de energía, empeorando el problema de disponibilidad de tierras. Para abordar estos problemas, cada país está trabajando en establecer una definición clara de los sistemas agrivoltáicos. Este es el primer paso hacia la promoción de AVS a nivel nacional. Como cualquier nueva tecnología, AVS requiere extensos subsidios y reformas políticas para facilitar su adopción a gran escala.



## 5. Agrivoltaica en España

---

## 5.1. Estado actual y desarrollos

### 5.1.1. Proyectos e Iniciativas Clave

El primer proyecto agrivoltáico en España fue iniciado por Endesa en Extremadura y Andalucía. En Valdecaballeros, Endesa colaboró con el Centro Tecnológico Agroalimentario de Extremadura (CTAEX) para cultivar tomillo, romero, diente de león y aloe vera, además de integrar el pastoreo de ovejas y crear un aviario. Actualmente, cuenta con más de seis proyectos agrivoltáicos en España y planea expandirse, particularmente en el sector de la "miel solar", que integra la fotovoltaica con la apicultura.

Según Kaila, España lidera la UE en proyectos agrivoltáicos, con alrededor de 29 proyectos financiados por subvenciones. Nuevas startups como Powerfulltree también están contribuyendo a este sector evaluando soluciones agrivoltáicas en comunidades insulares como las Islas Canarias. Dadas las condiciones favorables de España para la energía solar y su renombrada producción agrícola, los agrivoltáicos presentan una oportunidad significativa para avanzar en los objetivos de Neutralidad de Carbono (NZE) del país.



Figura 15. Planta agrivoltaica de Endesa en Valdecaballeros [27].

De los 13 proyectos agrivoltáicos financiados por la UE, ocho están financiados bajo el programa Horizonte Europa, que apoya la investigación y el desarrollo en tecnología relacionada con el cambio climático. Por ejemplo, el proyecto SYMBIOSYST, con una subvención de 4,827 millones de euros, tiene como objetivo reducir los costos de fabricación de sistemas agrivoltáicos (AVS) a través de la eficiencia operativa y crear soluciones estéticamente agradables que puedan ser

fabricadas en masa e integrarse de manera armoniosa con la tierra agrícola, manteniendo la agricultura como objetivo principal.

Enel Green ha instalado alrededor de 260,000 paneles solares bifaciales en Sevilla, produciendo 302 GWh/año. Utilizan sistemas avanzados con muchos sensores para crear un gemelo virtual del sistema para supervisión. En sus diversos sistemas agrivoltáicos, han experimentado con una variedad de cultivos, incluyendo plantas aromáticas y medicinales, cultivos de valor añadido y cultivos comunes como pimiento rojo y brócoli. Además, están explorando la apicultura, la generación de hidrógeno verde y la construcción de refugios para aves.

Enel Green también está desarrollando herramientas digitales para evaluar la viabilidad de implementar AVS en ubicaciones específicas y para ayudar en la supervisión y optimización de sistemas inteligentes, similar al proyecto Winesolar de Iberdrola en Toledo [30]. Este proyecto utiliza PV montados con seguimiento solar para optimizar el rendimiento considerando factores como el clima, la radiación solar y la humedad del suelo.

### 5.1.2. Políticas y Apoyo Gubernamental

La adopción de agrivoltaicos en España ha sido más lenta en comparación con otras regiones, lo que se refleja en el limitado apoyo político destacado en un informe europeo. El informe de UNEF sugiere que implementar un proceso de autorización acelerado y definir cuotas de conexión a la red dedicadas a Agri-PV podría acelerar la implementación de proyectos. Esto a pesar de que España tiene la segunda mayor capacidad fotovoltaica instalada a partir de 2022 y un robusto objetivo de la Nueva Política de Tendencias NECP de 2030 de 92 GW, que puede alcanzarse utilizando solo el 0.44 - 2% de su Área Agrícola Utilizada (UAA) para agrivoltaicos [31].

Para fortalecer el sector, el Ministerio para la Transición Ecológica de España (MITECO) lanzó un programa de subvenciones por un total de 220 millones de euros, con 50 millones de euros asignados exclusivamente a proyectos agrivoltáicos. Esta es la primera iniciativa de subvención del gobierno español para los agrivoltáicos, y se distribuye en tres categorías: instalaciones de AVS dentro de cultivos (10 millones de euros), instalaciones de AVS entre 2 y 4 metros de altura (20 millones de euros) e instalaciones de AVS de más de 4 metros de altura (20 millones de euros) [32].

En varias provincias, incluidas las Islas Baleares, los marcos regulatorios no mencionan explícitamente los agrivoltáicos, pero fomentan la sinergia entre las actividades agrícolas y la integración de energías renovables. Cataluña, como la provincia líder en regulación de AVS, tiene el 'Plan Estratégico de la Alimentación de Cataluña (PEAC) 2021-2026' bajo el 'Decreto de Ley 16/2019', que permite específicamente las instalaciones de AVS en tierras agrícolas, siempre que no se desplacen cultivos perennes y permanentes y los rendimientos de los cultivos cumplan con al menos el 60% de los rendimientos de referencia [33].

Cataluña ha establecido además reglas para dos tipos de sistemas agrivoltáicos:

#### **Categoría I: AVS de soporte elevado**

La pérdida de tierras agrícolas no debe superar el 15% del total.

Las estructuras deben permitir el paso normal de maquinaria.

La reducción de radiación (por sombra) no debe superar el 40%, excepto para kiwis y bayas, donde puede llegar hasta el 50%.

El acceso a la AVS para el mantenimiento debe realizarse por caminos específicos y no perturbar los cultivos.

#### **Categoría II: AVS de soporte elevado**

La pérdida de tierras no debe superar el 20%.

La altura máxima es de 5 metros.

Se debe integrar un sistema de recolección de agua de lluvia.

El mantenimiento debe realizarse sin afectar a los cultivos.

Esto representa un primer paso hacia la aceptación nacional de los agrivoltáicos. A medida que avanzamos, es esencial una definición y categorización integral de los agrivoltáicos para desarrollar una legislación general que distinga a los AVS de los sistemas fotovoltaicos convencionales.

Un marco regulatorio propuesto debería establecer objetivos de MW para la implementación de AVS y categorizar los cultivos en función de las condiciones geográficas y climáticas para facilitar la integración en las regulaciones estatales. Distinguir los AVS de los sistemas fotovoltaicos es crucial para alinearse con la Política Agrícola Común y salvaguardar las subvenciones agrícolas públicas. Además, se debería considerar la integración de los agrivoltáicos en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para garantizar la compatibilidad ambiental y el cumplimiento normativo.

## 5.2. Paisaje Agrícola y Energético en España

### 5.2.1. Prácticas Agrícolas y Selección de Cultivos

Según el Censo Agrario de 2020, España cuenta con aproximadamente 915,000 explotaciones agrícolas que cubren un área agrícola utilizada total de 23.9 millones de hectáreas. La mayor parte de esta tierra es propiedad de los agricultores (52%), con una porción menor arrendada principalmente por jóvenes agricultores (37%), y el resto bajo diversos acuerdos como el arrendamiento (11%). Es notable que el 41% de los gestores de explotaciones tiene más de 65 años, supervisando granjas más pequeñas y económicamente menos significativas. Sin embargo, la mano de obra envejecida presenta desafíos significativos para la planificación de sucesiones y la transferencia de conocimientos dentro del sector agrícola de España, reflejando preocupaciones globales más amplias en la agricultura.

El mayor consumo de energía en España se debe a la metalurgia (17.4%), siendo la industria alimentaria la segunda en consumo (15.8%). La mayor parte de esta energía (64.5%) proviene de fuentes renovables y el 87.1% está libre de emisiones de CO<sub>2</sub>. Con el 25.1% de esta energía renovable proveniente de paneles fotovoltaicos, todavía hay espacio para que el sector crezca [35]. Según el informe de la JRC, al cubrir solo el 1% de nuestra área agrícola utilizada, España podría quintuplicar la capacidad fotovoltaica instalada y, utilizando entre el 0.44 y el 2% de la UAA (dependiendo de la capacidad fotovoltaica) para agrivoltáicos, podríamos alcanzar los objetivos de generación de 92 GW establecidos en el NECP de 2030 [31].

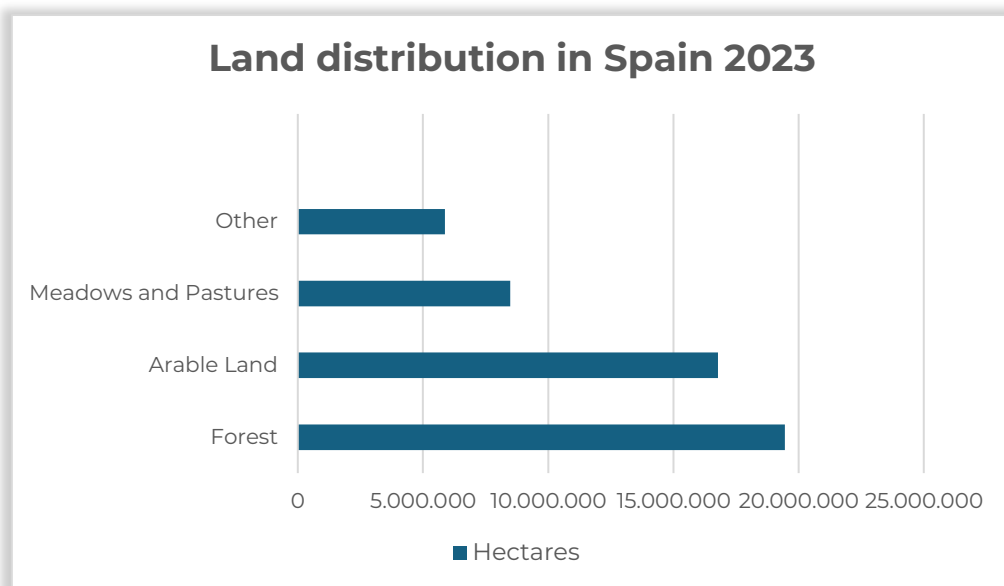


Figura 16. Distribución del suelo en España 2023 [36].

La Encuesta sobre Superficies y Rendimientos (ESYRCE) de 2023 [36] mostró una ligera disminución en el área de cultivos herbáceos debido a las reducciones en cereales, cultivos industriales, forrajes, tubérculos y verduras. El único grupo que aumentó en área en comparación con 2022 es el de las legumbres. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en 2022, el mayor cultivo de España (el mayor del mundo) fueron las aceitunas, con 2,635,280 hectáreas, seguido de la cebada con 2,398,000 hectáreas y el trigo con 2,172,700 hectáreas. Otros cultivos importantes que crecen mejor bajo agrivoltaicos incluyen uvas, tomates, fresas y lechugas. España alcanza niveles de radiación solar de entre 1,600 kW/m<sup>2</sup> y 1,950 kW/m<sup>2</sup> [37], y al contar con una de las áreas agrícolas utilizadas más grandes y productivas de la UE, está muy bien posicionada para aprovechar los avances en agrivoltaicos.

## 5.3. Estudios de Caso de España

### 5.3.1. Implementaciones Exitosas

Hay algunos proyectos agrivoltaicos en España donde intentan encontrar la combinación óptima para el país; estos son algunos de ellos:

| Nombre                              | Ubicación         | Instalación Agrícola                                                          | Instalación Agrivoltaica                                                                                           |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wine Solar (Iberdrola)              | Guadamur (Toledo) | Viñedo                                                                        | Sistema controlado por IA de 40 kW con rastreadores inteligentes                                                   |
| Agrisol IASOL                       | Murcia            | Pimienta                                                                      | Proyecto de investigación de 10kW (efecto invernadero)                                                             |
| Picassent (INDEREN)                 | Valencia          | Viñedo                                                                        | Instalación de 1MW que cubre el 50% del terreno                                                                    |
| Totana (ENDESA)                     | Murcia            | Pimiento rojo, brócoli, alcachofa, tomillo y pitaya                           | 85MW para agrivoltaica y 8 ha para refugio de aves                                                                 |
| Las Corchas y los Naranjos (ENDESA) | Sevilla           | Cilantro, Aloe Vera, Romero, Tomillo y pradera para alimentación +10 colmenas | 302 GWh/año utilizando realidad virtual para supervisión, fotovoltaica bifacial y pastoreo de ovejas para desmonte |

Tabla 2. Proyectos AV en España.

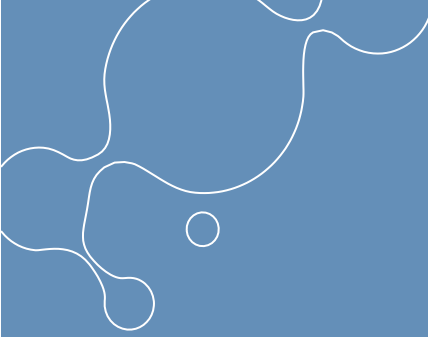
Como podemos observar, hay una amplia variedad de proyectos agrivoltaicos en España, y dado que los AVS son una tecnología nueva, la mayoría están dedicados a investigar la configuración más eficiente de cultivos y paneles fotovoltaicos (PV), o incluso algunos proyectos, como el que Endesa está comenzando en Andorra, que tiene como objetivo la hibridación de la energía solar y eólica, acoplándola con almacenamiento de energía y el desarrollo de hidrógeno verde para descarbonizar las industrias locales. Podemos afirmar con confianza que, aunque España fue lenta en su adopción, se ha posicionado como líder en el campo de la agrivoltaica con proyectos como SUSTAINEXT, que está coordinado por NATAC y cuenta con un presupuesto de 22,406,559€, con el cual pretenden producir tres tipos de plantas medicinales en antiguas plantaciones de tabaco no utilizadas en Extremadura.

### 5.3.2. Lecciones Aprendidas y Mejores Prácticas

Ante este enorme aumento de proyectos agrivoltaicos en España en los últimos años, es evidente que hay grandes cantidades de potencial no explotado. Desde un principio, se dijo que los AVS eran los más

eficientes en paisajes semiáridos y áridos, con granjas remotas y alta radiación solar, lo que hizo de España un lugar ideal. Sin embargo, dado que es una tecnología nueva y hay una falta de conocimiento simultáneo en fotovoltaica y agrivoltaicos, no existe una guía de mejores prácticas, especialmente para adaptar soluciones PV a diferentes categorías de cultivos, y los estudios existentes pueden no ser tan relevantes, ya que hay muchos otros factores ambientales que podrían hacer que un cultivo bajo el mismo PV produzca más o menos.

Si queremos acelerar los AVS en España, se recomienda que los promotores fotovoltaicos tengan conocimientos complementarios en agricultura y ganadería y desarrollen un documento de caracterización del proyecto y una guía de AVS para cada estado, que identifique el cultivo y el sistema agrivoltaico más adecuados para esa área, mostrando el clima, los cultivos, el terreno y el impacto que la agrivoltaica podría tener allí. Para ello, es esencial que los promotores y las instituciones encargadas de la agricultura cooperen estrechamente para facilitar la disponibilidad de información y la cooperación con entidades privadas para desarrollar tales proyectos a mayor escala.



## 6. Viabilidad de la agrivoltaica en las Islas Baleares

---

## 6.1. Condiciones Geográficas y Climáticas

### 6.1.1. Irradiación Solar y Patrones Meteorológicos

Según la AEMET, las Islas Baleares experimentan una precipitación anual de aproximadamente 500-600 mm, con temperaturas medias que oscilan entre 15-17.5 °C y alrededor de 2600-2800 horas de sol al año. Mallorca, en particular, recibe entre 3.98 y 4.38 kWh/kWp de energía fotovoltaica específica, con una inclinación óptima para los módulos fotovoltaicos entre 31 y 34 grados, según el Atlas Solar Global compilado por el Grupo del Banco Mundial [39].

Las Baleares se caracterizan por veranos calurosos, inviernos suaves y, en general, baja pluviosidad, con aproximadamente 300 días soleados al año. Este clima es ideal tanto para el turismo como para la producción de energía solar. Sin embargo, las altas temperaturas y la escasez de precipitaciones también conducen a sequías, exacerbadas por el sector turístico, lo que convierte al agua en un recurso valioso. Este escenario subraya la idoneidad de los AVS para la región.

A pesar del clima suave, las islas experimentan ocasionalmente eventos meteorológicos extremos, como la tormenta del 27 de agosto de 2023, que trajo vientos récord de hasta 108 km/h [40]. Aunque las ocurrencias de granizo y nieve son raras, la región a veces experimenta "lluvia de barro", donde el polvo del norte de África es transportado por vientos fuertes y cae con la lluvia, cubriendo la tierra con una fina capa de barro. Este fenómeno puede reducir significativamente la eficiencia de los paneles solares. Estas condiciones meteorológicas extremas, aunque históricamente infrecuentes, están convirtiéndose en más comunes debido al calentamiento global. Esto resalta los beneficios potenciales de los AVS no solo en la generación de electricidad, sino también en la protección de los cultivos frente a patrones climáticos cada vez más inestables.

### 6.1.2. Tipos de Suelo y Adecuación Agrícola

En las Islas Baleares, aproximadamente el 42% de la superficie terrestre, o alrededor de 209,000 hectáreas, está dedicada a la agricultura, que comprende cultivos permanentes y tierras de cultivo. Esto incluye el 27% de pastos permanentes mediterráneos (matorrales y áreas boscosas) y 90,000 hectáreas de bosque [41]. El paisaje agrícola de la región integra tanto el cultivo de cultivos como la ganadería, siendo los cereales a menudo combinados con nueces, aceitunas, algarrobo y viñedos. En los últimos 20 años, los precios de la tierra han aumentado más del 60%, alcanzando los 19,770 euros por hectárea, lo

que es un 30% más alto que la media nacional. Al mismo tiempo, la asignación de agua para la agricultura ha disminuido del 50% al 24% de los recursos totales, en gran parte debido a la creciente demanda del sector turístico por recursos de tierra y agua para apoyar hoteles, piscinas y otras comodidades.

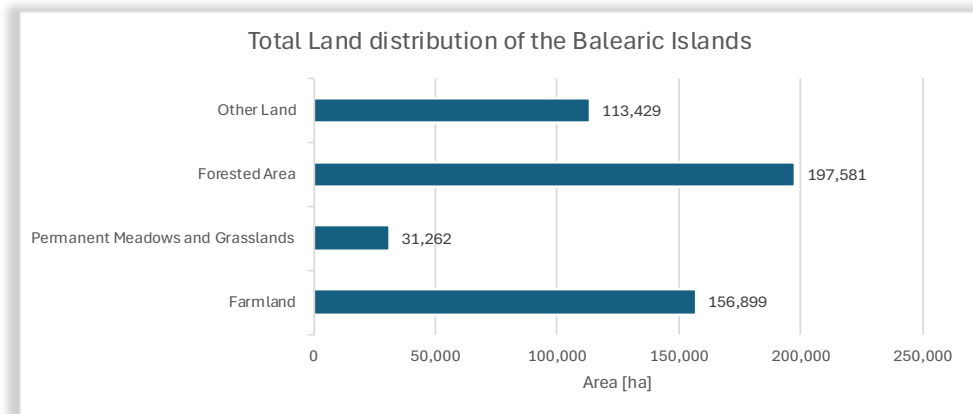


Figura 17. Distribución del suelo en las Islas Baleares [36].

Se puede observar que, de las 499,170 hectáreas de tierra en las Baleares, el 31.4% es tierra agrícola, el 6.3% son praderas permanentes y pastizales, el 39.6% es área forestal y el resto se utiliza para otros propósitos. De esta tierra agrícola, el ESYRCE encuestó una serie de parcelas para obtener el siguiente rendimiento de referencia para cada cultivo en el archipiélago:

| Cultivo               | Rendimientos [kg/ha] |         |             |
|-----------------------|----------------------|---------|-------------|
|                       | Secano               | Regadío | Invernadero |
| Trigo Blando          | 2.009                | 6.153   |             |
| Cebada 2 Carreras     | 1.161                | 4.785   |             |
| Cebada 6 Carreras     | 1.007                |         |             |
| Avena                 | 847                  |         |             |
| Triticale             | 3.612                |         |             |
| Patata                |                      | 32.940  |             |
| Maíz Forrajero        |                      | 38.027  |             |
| Tomate                |                      |         | 52.606      |
| Sandía                |                      | 25.378  |             |
| Melón                 |                      | 30.650  |             |
| Cebolla               |                      | 30.430  |             |
| Naranja               |                      | 4.851   |             |
| Limonero              |                      | 14.128  |             |
| Almendra              | 123                  | 2.090   |             |
| Uva de Transformación | 2.600                | 6.979   |             |
| Olivo de Almazara     | 3.442                | 1.644   |             |

Tabla 3. Rendimiento de referencia de los cultivos en las Islas Baleares [36].

En tabla anterior, se puede observar el rendimiento promedio de los cultivos cultivados en Baleares. Este dato se puede tener en cuenta para calcular la Relación de Equivalencia de Tierra (LER) y así el rendimiento de un AVS.

Las Islas Baleares experimentan baja pluviosidad y alta radiación solar, lo que influye en los tipos de cultivos que se cultivan. Los cultivos hortícolas notables incluyen repollo, lechuga, escarola, tomate y cebolla, mientras que la producción de frutas presenta albaricoques, almendras, algarrobo y cítricos. Se garantiza el suministro de mercado durante todo el año a través de la producción de verduras de hojas y tallos. Las patatas son cruciales tanto para la exportación como para el consumo interno, con períodos de cosecha desde mediados de marzo hasta mediados de mayo y del 15 de noviembre al 15 de enero. Otros cultivos significativos incluyen pimientos, berenjenas, coliflores, fresas, melones y sandías. Sin embargo, el cultivo de tomates ha disminuido debido a la plaga de Tuta absoluta, que requiere un uso excesivo de pesticidas o costosos métodos de control biológico.

| Cultivo | Proyecto                            | AVS                                                             | Resultado                                                                                                                         |
|---------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Patata  | Rheinstetten, Forchheim, (Alemania) | Sombra de malla (Experimento) de 0,12,26 y 50% de sombra        | Retraso en la floración, la biomasa se movió más por encima del suelo y los tubos eran ligeramente más pequeños y menos numerosos |
| Trigo   | Montpellier (Francia)               | 0, 30 y 50% de sombreado PV                                     | Pequeño retraso en la velocidad de crecimiento y madurez                                                                          |
|         | Nanjing (China)                     | Paneles de sombreado de 0, 8, 15 y 23% (experimento)            | El área superior de plomo aumentó, los rendimientos aumentaron a pleno sol para el nivel de sombra más bajo (8%)                  |
|         | Plasencia (España)                  | Malla de polietileno (experimento) 0, 10, 25 y 50% de sombreado | Alrededor de un 15-20% de aumento del rendimiento. Aumento del tiempo de maduración.                                              |
| Lechuga | Montpellier (Francia)               | 30, 24% de sombreado                                            | Disminución del 18% en la masa seca para Madelona y ninguna para Kiribati.                                                        |
| Tomate  | Arizona (USA)                       | Módulos orientados al sur a 3,3 m de altura                     | Aumentó la eficiencia hídrica en un 65% y la producción total de fruta se duplicó                                                 |
|         | Oregon (USA)                        | 3 m de ancho, orientación sur, 0,8 m PV sobre el suelo          | Reducción del rendimiento del 32-38 % para AVS en hilera y del 48-60 % en el rendimiento con AVS elevado                          |

Tabla 4: Proyectos agrivoltaicos por cultivo

La tabla anterior presenta resultados de varios proyectos agrivoltaicos y experimentos de campo realizados en todo el mundo. Es importante señalar que el rendimiento de los AVS es altamente específico del sitio, y predecir el rendimiento de un cultivo particular en una nueva ubicación es un desafío, a menos que se hayan realizado ensayos similares anteriormente. Sin embargo, examinar sitios con clima, suelo y configuraciones comparables puede proporcionar información útil sobre el rendimiento potencial de los AVS.

Por lo general, los AVS informan reducciones en el rendimiento y maduración retrasada de los cultivos. Esto se espera, aunque ciertos cultivos, como las verduras de hoja, que son más tolerantes a la sombra, pueden desempeñarse mejor bajo sombra parcial y, por lo tanto, son adecuados para los AVS. Dado que la agrivoltaica es una tecnología relativamente nueva, los datos sobre los cultivos óptimos para estos sistemas aún son limitados, pero investigaciones han demostrado que para árboles como los olivos, que son comunes en las Baleares y en España, una transparencia de paneles fotovoltaicos del 57-71% es óptima [42].

A pesar de los beneficios de la generación de energía, los AVS generalmente conducen a una reducción en el rendimiento agrícola. Económicamente, esta pérdida a menudo se compensa con la energía producida por los paneles solares. Sin embargo, es necesario establecer regulaciones para limitar la pérdida de rendimiento agrícola, con algunas directrices que sugieren una reducción máxima del 30-40%. Los agricultores han indicado que estarían cómodos con una reducción de hasta el 20% en el rendimiento [14]. Además, es esencial tener en cuenta la pequeña pérdida de tierra debido a las estructuras de soporte fotovoltaico y sus alrededores inmediatos, que no son fácilmente cultivables.

## 6.2. Beneficios y Desafíos Económicos y Sociales

### 6.2.1. Economía Local y Agricultura

Según el censo de 2001, la agricultura y la pesca contribuyeron apenas con el 1% al Valor Añadido Bruto (VAB) en las Islas Baleares, un porcentaje que probablemente se ha reducido aún más por la expansión del turismo. A nivel global, la agricultura enfrenta un declive en nuevos entrantes y una población agrícola envejecida, lo que arriesga la pérdida de conocimientos especializados desarrollados a lo largo de los siglos. En las Islas Baleares, este cambio generacional se ve agravado por la fragmentación de la propiedad de la tierra, donde grandes extensiones son compradas por inversores y gestionadas por

agricultores contratados. Esta fragmentación requiere negociaciones separadas con los propietarios de la tierra y los agricultores para la implementación exitosa de proyectos agrivoltaicos.

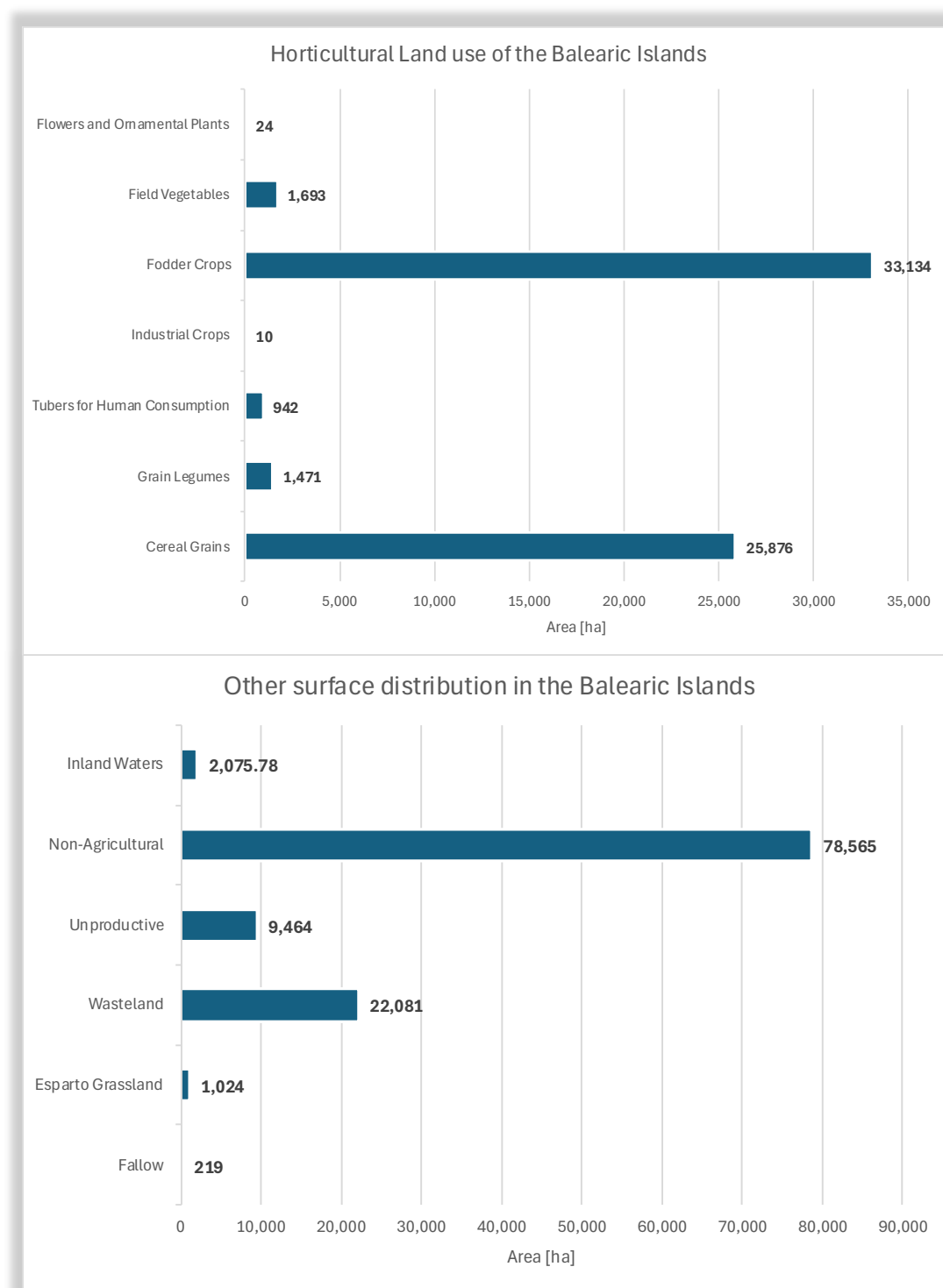


Figura 18. Usos del suelo hortícolas y de otro tipo en las Islas Baleares[36].

En la figura anterior, podemos observar que la mayoría de las plantaciones hortícolas en las Islas Baleares se utilizan para producir forrajes y cereales, mientras que la mayor parte de la otra tierra se utiliza para fines no agrícolas o se considera terreno baldío. Aquí se puede ver el potencial para implementar agrivoltaicos en el cultivo de forrajes como la alfalfa, la cebada y el trébol, así como en cereales como el arroz y el trigo.

A pesar de una posible disminución ligera en la productividad agrícola con los AVS, los veranos o estaciones rigurosos pueden ver rendimientos más altos gracias a la sombra y protección proporcionadas por los paneles solares. Así, la productividad general de las Islas Baleares podría aumentar, ya que la tierra anteriormente dedicada exclusivamente a la energía solar ahora puede apoyar aplicaciones agrivoltaicas.

En Mallorca, el proveedor de energía Endesa está liderando pequeños proyectos agrivoltaicos. De los cuatro propuestos al Departamento de Agricultura, se aprobaron dos. Un proyecto consiste en elevar ligeramente los paneles para permitir el pastoreo de las ovejas rojas nativas, lo que reduce su estrés y mejora su salud al proporcionar refugio del sol. Otro proyecto, 'Miel Solar', colabora con apicultores locales para producir 'miel verde' al establecer colmenas en plantas fotovoltaicas. Aunque son enfoques innovadores, estos pueden no considerarse estrictamente agrivoltaicos, y los intentos de cultivar frutas y algarrobo bajo paneles fotovoltaicos fueron rechazados por no contar con suficiente innovación que justificara el uso de la tierra.

Además, los AVS mejoran la eficiencia del agua cuando se combinan con sistemas adecuados de captura de agua. Un estudio reciente [43] mostró que integrar la energía solar fotovoltaica con la desalinización de agua de mar a través de ósmosis inversa podría reducir los costos de producción de agua por debajo de 0,36 €/m<sup>3</sup>. Esto es particularmente beneficioso para comunidades insulares como las Islas Baleares, que tienen sectores intensivos en agua como el turismo y la agricultura, y recursos limitados debido a la escasez de precipitaciones.

### 6.2.2. Regulaciones Locales

En las Islas Baleares, la regulación del Pla Sectorial rige la integración de sistemas fotovoltaicos (PV) en tierras agrícolas [44]. La legislación actual no diferencia entre paneles solares montados en el suelo convencionales y los agrivoltaicos. Los proveedores deben adherirse a las siguientes restricciones de altura para los paneles solares:

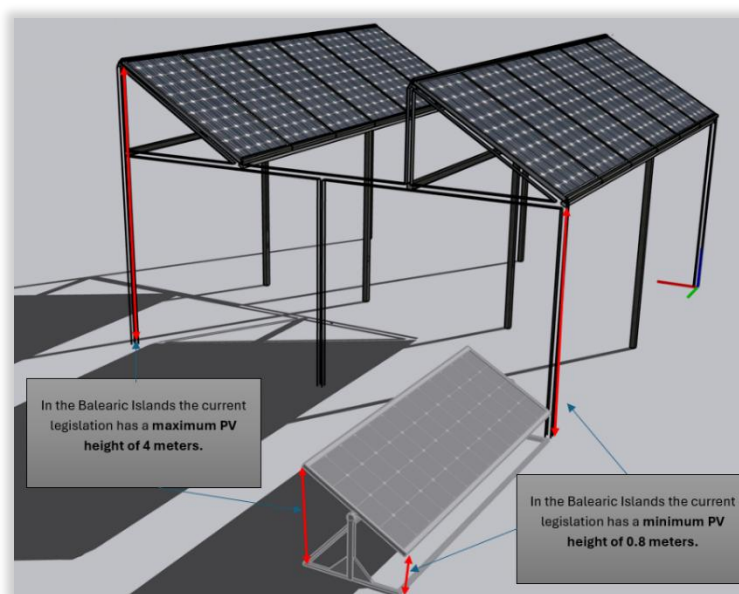


Figura 19. Regulaciones de altura fotovoltaica en las Islas Baleares.

Para instalaciones fotovoltaicas (PV) más grandes, se requiere que los proveedores implementen medidas compensatorias o integren actividades agrícolas dentro del parque solar. Específicamente, el rendimiento agrícola no debe disminuir en más de un 40% en comparación con la producción agrícola total de la tierra. Los proyectos deben ser evaluados y aprobados por la 'Dirección General de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural'. La aprobación es más probable si el proyecto se considera 'altamente innovador'; sin embargo, los criterios para esta designación no están claramente definidos y quedan a la discreción del personal evaluador.

Además, si se aprueba, la gestión del proyecto debe ser llevada a cabo por una 'explotación agraria o ganadera profesional o prioritaria', lo que excluye a muchos agricultores jóvenes o inexpertos de la participación. La falta de instalaciones de investigación en las Islas Baleares complica aún más este proceso, ya que impide la colaboración eficiente entre agencias gubernamentales, proveedores de energía y agricultores. En consecuencia, los proveedores de energía a menudo enfrentan retrasos y desafíos para comunicarse y negociar con agricultores

individuales, excluyendo potencialmente a aquellos que podrían estar interesados debido a la falta de divulgación.

### 6.2.3. Demanda y Suministro de Energía

Hasta el 10 de julio, solo alrededor del 25% de la energía de las Islas Baleares se genera a través de sistemas fotovoltaicos (PV) en producción máxima (14:00). Aproximadamente el 30% se importa del continente, otro 30% se produce en plantas de ciclo combinado y el resto por motores diésel residuales y turbinas de gas [45]. Lograr la descarbonización total para 2040 requerirá un aumento significativo en la producción de energía renovable. Sin embargo, como comunidad insular con espacio limitado y amplias tierras protegidas, las opciones para la generación de energía son restringidas.

La energía eólica no es prevalente en las Islas Baleares debido a patrones de viento inconsistentes, espacio limitado y fuerte oposición pública. En consecuencia, proyectos a gran escala como parques eólicos, granjas de biomasa y extensas instalaciones solares son poco prácticos. Los proveedores de energía han estado promoviendo paneles solares de uso personal para los residentes, aprovechando los 300 días soleados anuales de las islas, y comprando pequeñas parcelas de tierra para pequeñas granjas solares. Sin embargo, estas medidas son insuficientes para lograr una neutralidad de carbono del 100% para 2040.

Para abordar esto, las Islas Baleares se han convertido en un proyecto piloto de la iniciativa 'Energía Limpia en las Islas de la UE', que tiene como objetivo ayudar a lograr la neutralidad de carbono. La financiación de esta iniciativa apoya el Proyecto Green Hysland, que busca producir hidrógeno verde en Mallorca [20]. Aunque el hidrógeno verde es prometedor, aún se encuentra en la fase piloto y no puede satisfacer completamente las necesidades energéticas de las islas. Por lo tanto, la energía solar sigue siendo un enfoque crítico.

Dada la competencia por la tierra entre los locales, los turistas y las empresas de energía, maximizar la eficiencia del uso del suelo es crucial. Los agrivoltaicos ofrecen una solución viable. Aunque puede que no sea tan productivo como las granjas solares dedicadas, los agrivoltaicos permiten una producción significativa de energía sin cambiar el uso de la tierra. Además, promueven la agricultura y apoyan a los agricultores que enfrentan costos crecientes.

Al integrar paneles solares con actividades agrícolas, los agrivoltaicos pueden ayudar a las Islas Baleares a avanzar hacia sus objetivos de

descarbonización mientras apoyan la agricultura local y hacen un uso eficiente de la tierra disponible. Asumiendo una capacidad instalada de 0.6 MW/ha, como lo reporta el Centro Común de Investigación (JRC), el potencial de implementar agrivoltaicos en Baleares es significativo. Según el ESYRCE, el archipiélago tiene alrededor de 188,161 hectáreas de tierras agrícolas y praderas permanentes. Con esta capacidad, las Islas podrían generar 112.9 GW si se utilizara toda la tierra agrícola disponible, con 11.35 GW adicionales si se incluyeran las tierras baldías y no productivas. Esto hace que el potencial total de los agrivoltaicos en las Islas Baleares sea de alrededor de 124.35 GW de capacidad instalada.

Asumiendo un escenario de peor caso el 24 de diciembre de 2023, con baja radiación solar y alta demanda de energía, a las 14:00, el suministro de energía en las Islas Baleares se componía del 42.94% de plantas de ciclo combinado, 21.78% importado del continente, 26.26% de solar PV, y el resto de no renovables. Para satisfacer la demanda de energía en un día así, Mallorca necesitaría instalar 722 hectáreas de agrivoltaicos para estar 100% descarbonizada. Por otro lado, en un día típico de verano como el 11 de julio de 2024, cuando la energía solar es más eficiente, se necesitarían 479.6 MW para reemplazar la energía no renovable y la importada [45]. Lograr esto requeriría aproximadamente 800 hectáreas de tierra cubiertas con AVS. Esto demuestra que cubrir alrededor de 800 hectáreas con agrivoltaicos, asumiendo una capacidad de 0.6 MW/ha, podría descarbonizar las islas utilizando solo el 0.43% de la tierra agrícola disponible.

Es importante señalar que no se recomienda utilizar toda la tierra agrícola para agrivoltaicos, ya que se necesita más investigación para comprender completamente las ventajas y desventajas de esta tecnología. Normalmente, los proyectos cubren alrededor de un tercio de su tierra agrícola con agrivoltaicos. En las Islas Baleares, esto se traduciría en alrededor de 56,448 hectáreas, capaces de producir hasta 33.87 GW de electricidad si se usaran para AVS, más que suficiente para satisfacer las necesidades de consumo de las islas. Además, los agrivoltaicos pueden reutilizar tierras agrícolas abandonadas y aumentar la productividad de las Islas Baleares.

Los AVS también sinergizan con otras fuentes de energía renovable, como la biomasa y el hidrógeno verde. Estas sinergias mejoran la eficiencia y sostenibilidad generales de la transición hacia energías renovables en las Islas Baleares. Al utilizar agrivoltaicos, las islas pueden avanzar hacia sus objetivos de energía renovable de manera rentable y eficiente en el uso de la tierra.

#### 6.2.3.1. Aceptación y compromiso de la comunidad

La aceptación pública es crucial para el éxito de los agrivoltaicos en las Islas Baleares, una región conocida por su belleza natural que atrae un turismo significativo. Muchos residentes están comprometidos con la preservación de este atractivo natural. Para mejorar la percepción pública, las Islas Baleares fueron pioneras en el primer parque fotovoltaico en España destinado a la participación local [47]. Aunque los proyectos de energía solar generalmente reciben comentarios positivos, también causan cierta contaminación visual, especialmente con sistemas PV montados que pueden alcanzar alturas superiores a los 4 metros, dependiendo del cultivo y la maquinaria de cosecha.

Las perspectivas de los agricultores también son esenciales. Casi la mitad de los agricultores de la región tienen más de 65 años, y las complejidades de instalar AVS —como el aumento de los costos de mantenimiento, los desafíos de almacenamiento de energía y las posibles disminuciones en el rendimiento agrícola— pueden ser desalentadoras [48]. Por lo tanto, es vital proporcionar información completa sobre los beneficios de los agrivoltaicos, enfatizando su potencial para apoyar tanto la producción de energía como la agricultura.

El apoyo gubernamental mediante subsidios es clave para iniciar proyectos agrivoltaicos en las Islas Baleares y demostrar su viabilidad. Para avanzar hacia los objetivos de energía renovable de España y la UE, es fundamental que las comunidades comprendan los beneficios del uso dual del suelo, frente a alternativas más intrusivas como la eólica marina o la biomasa a gran escala. Incentivos financieros y estrategias de comunicación eficaces pueden fomentar la aceptación pública y agrícola, impulsando la descarbonización sin comprometer el paisaje ni la agricultura local.

#### 6.2.3.2. Beneficios Económicos y Ambientales

La implementación de agrivoltaicos puede conducir a reducciones significativas de costos. Estos sistemas generan energía que puede ser consumida principalmente por los agricultores y su comunidad inmediata, aumentando así el ingreso disponible y reduciendo la carga en la red eléctrica. La energía excedente puede ser almacenada o vendida, proporcionando a los agricultores ingresos adicionales para estabilizar sus finanzas y protegerse contra malas cosechas. Además, el ahorro de agua de los agrivoltaicos puede aliviar la presión sobre los frágiles sistemas hídricos de las islas, y el exceso de energía solar puede ser utilizado para la desalación.

El crecimiento del sector agrivoltaico también crearía numerosos empleos en la industria de energía renovable, ya que se necesitarán personal para la instalación y el mantenimiento. Esto podría atraer a los jóvenes a la agricultura al demostrar que es un sector dinámico con muchas oportunidades.

Desde una perspectiva ambiental, las principales desventajas de los AVS son los gases de efecto invernadero asociados con la producción de estructuras de montaje y materiales de paneles solares. Sin embargo, estas desventajas se ven superadas por los beneficios de generar energía renovable.

### 6.3. Análisis DAFO

Al analizar las Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas de los agrivoltaicos, encontramos lo siguiente:

#### FORTALEZAS

- Protege los cultivos de condiciones climáticas extremas.
- Genera ingresos para los agricultores.
- Aumenta la resiliencia de la red eléctrica.
- Puede ser instalado fácilmente.
- Ahorra el 20% del agua de riego.
- Aumenta la productividad de la tierra en un 90%.
- Beneficia a los cultivos tolerantes a la sombra.
- Electrifica granjas y comunidades rurales.

#### DEBILIDADES

- Aumenta los costos de mantenimiento de la granja en un 30%.
- El exceso de energía es difícil de manejar.
- Pérdida de 2-8% de la tierra debido a soportes.
- Puede disminuir el rendimiento agrícola.
- Causa contaminación visual.
- Requiere entre 20% y 40% más de tierra que los sistemas convencionales montados en el suelo.
- Altos costos de instalación.
- Aumenta la complejidad en la gestión de la granja.

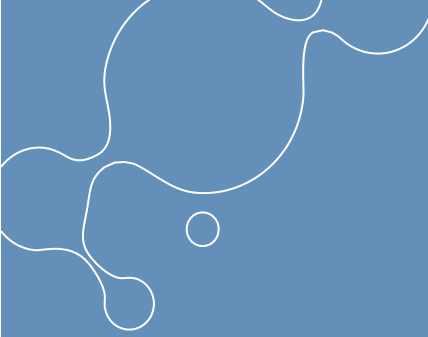
#### OPORTUNIDADES

- Se beneficia del rápido desarrollo de la tecnología FV (especialmente foselectiva).
- Puede usarse para recuperar tierras y detener la desertificación.
- Crea empleos en el sector de energías renovables.
- Proporciona energía a comunidades rurales.
- Se beneficia de incentivos gubernamentales, como los de IDAE.
- Ayuda en la mitigación del cambio climático.
- Puede ser utilizado para operaciones de H2 verde y desalación.

#### AMENAZAS

- Altura máxima de 4 metros.
- La generación de energía puede priorizarse sobre la producción agrícola.
- Incertidumbre y confusión regulatoria.
- Sujeto a la volatilidad de los mercados de energía y alimentos.
- Incerteza en el final de la vida útil y reciclaje.
- Hace que la granja sea más propensa a fallos técnicos.
- Compite por el uso de la tierra con otras fuentes de energía renovable.

El análisis DAFO de los agrivoltaicos revela una visión equilibrada de sus impactos potenciales. Las fortalezas de los agrivoltaicos incluyen su capacidad para proteger los cultivos de condiciones climáticas extremas, mejorar la resiliencia de la red y aumentar significativamente la productividad de la tierra. También ofrece beneficios financieros para los agricultores y contribuye a la conservación del agua. Sin embargo, las debilidades, como el aumento de los costos de mantenimiento, la posible pérdida de tierras y los altos gastos de instalación, destacan los desafíos asociados con la adopción de esta tecnología. A pesar de estos desafíos, los agrivoltaicos presentan varias oportunidades, incluyendo el avance de las tecnologías fotovoltaicas foselectivas, la creación de empleo en el sector renovable y la alineación con los objetivos de mitigación del cambio climático. Por el contrario, amenazas como las limitaciones regulatorias, la priorización de la energía sobre los cultivos y las incertidumbres técnicas podrían obstaculizar su implementación. Abordar estos factores será crucial para optimizar los beneficios de los agrivoltaicos.



## 7. Evaluación y recomendaciones

---

## 7.1. Evaluación de Viabilidad

### 7.1.1. Viabilidad Técnica

Los requisitos técnicos de los agrivoltaicos pueden variar considerablemente dependiendo de la complejidad del proyecto. En general, los agrivoltaicos no requieren una instalación extremadamente compleja y son muy adaptables para aplicarse en cualquier tipo de situación. Sin embargo, se debe realizar una evaluación del sitio, ya que, aunque pueden ofrecer muchos beneficios, los AVS no son adecuados para todas las situaciones.

El sistema agrivoltaico más simple puede obtenerse introduciendo una fila de paneles fotovoltaicos entre las capas de cultivo, mientras que el más complejo podría ser un sistema agrivoltaico de doble eje con seguimiento solar de más de 4 metros de altura que genera hidrógeno. Esto significa que la viabilidad técnica del proyecto depende de cuán avanzado se desee que sea. Hasta la fecha, parece que los modelos más simples, como filas verticales o sistemas montados fijos, ya son económicamente y técnicamente viables para la mayoría de las personas interesadas en realizar un proyecto, mientras que los más avanzados se utilizan para proyectos de investigación para evaluar los efectos de la nueva tecnología.

Idealmente, los proyectos agrivoltaicos deberían permitir que el agricultor se encargue del campo, mientras que el proveedor se ocupa del mantenimiento y la instalación del sistema agrivoltaico, manteniendo un contacto cercano para conocer las necesidades de cada uno y trabajar hacia una solución óptima. En general, los agrivoltaicos no son extremadamente desafiantes desde el punto de vista técnico y, por lo tanto, se pueden implementar con relativa facilidad sin requerir una capacitación adicional extensa.

En las Baleares, aunque puede haber costos adicionales debido a la necesidad de importar los paneles fotovoltaicos y las estructuras desde la península, no debería haber problemas con la implementación de AVS. Un posible desafío es que, en la cordillera occidental de la isla, existen terrazas agrícolas; hasta la fecha, no parece haberse realizado ningún proyecto agrivoltaico en una terraza agrícola, pero podrían surgir sinergias interesantes si las paredes pueden soportar el peso de los paneles, de modo que los paneles se puedan montar horizontalmente en las paredes o en un ángulo. Sin embargo, esto debe investigarse más a fondo.

### 7.1.2. Viabilidad Económica

Una vez más, la viabilidad económica de un proyecto agrivoltaico es muy dependiente del sitio. En términos de costos incurridos, el factor más importante es la ubicación y la accesibilidad de la granja y la comunidad. Cualquier envío que deba realizarse desde la península o de otros países aumentará los costos iniciales, y si el sitio es difícil de acceder, dificultará la instalación y el mantenimiento, que también depende de la altura del sistema montado o la complejidad del mismo. Hay un costo de oportunidad relevante en la pérdida de rendimiento agrícola, pero es negligible en comparación con el beneficio obtenido de la electricidad generada y ahorrada.

En términos de beneficios, el más grande por mucho es el beneficio obtenido por el autoconsumo de electricidad, que en España a fecha de hoy, 24/07/2024, según el OMIE, tiene un precio medio de electricidad de 94.88 €/MWh [49]. Esto se debe a que, en promedio, por la venta de energía excedente, el proveedor acreditará a los propietarios de viviendas entre 0.06 €/kWh y 0.08 €/kWh [50], lo cual es insignificante en comparación con el costo, y así la importancia de maximizar el autoconsumo. Sin embargo, esto, por supuesto, también depende de los costos de electricidad y del proveedor elegido.

De manera similar, las ganancias obtenidas de la venta de cultivos o, por el contrario, la pérdida de rendimiento debido a los paneles, son casi insignificantes en comparación con los ahorros obtenidos del autoconsumo de la electricidad generada. Además de los costos de instalación, que para algo como un sistema montado (650 kW) pueden ser aproximadamente €1,234 por kW, y la inversión total ronda los €802,100 por hectárea [28], también puede haber una pérdida parcial de subsidios agrícolas, ya que no toda la tierra se utiliza para cultivar. Por lo tanto, es muy importante que los gobiernos subsidien la agrivoltaica y cambien las regulaciones para favorecer su implementación, ya que conllevan costos iniciales significativos que pueden disuadir a muchos agricultores de adoptar este sistema en sus tierras. Subsidiar esta tecnología ayudaría no solo a aumentar la productividad de la tierra y generar más energía renovable, sino también a aumentar la cantidad de información sobre estas prácticas que se puede recopilar para generar un informe de mejores prácticas y recomendaciones para futuros usuarios y optimizar el proceso. Afortunadamente, esto ya está en marcha en España, con el MITECO y el IDAE planeando utilizar 50 M€ para subsidiar proyectos agrivoltaicos en España y cambiar la regulación. También hay muchos proveedores de energía, como Iberdrola y Endesa, o proyectos de financiación de la UE como HORIZON.

### 7.1.3. Impacto Ambiental

En las Baleares, tener agrivoltaica podría proporcionar a los cultivos protección contra el abrasador sol de verano y las temperaturas en constante aumento. Además, puede proteger el suelo y los cultivos de tormentas y fuertes lluvias y vientos, mientras que aún se recolecta agua y se hace la granja más eficiente en el uso del agua. En el área inmediatamente cerca de los soportes, que no es adecuada para el cultivo, se pueden plantar plantas polinizadoras para aumentar la biodiversidad en el área y promover la polinización. Además, la sombra proporcionada por los paneles fotovoltaicos servirá como refugio para el ganado, como la oveja roja nativa, y para los agricultores, mejorando su bienestar, especialmente en el caluroso verano. Los impactos ambientales negativos derivados de la agrivoltaica se encuentran en la fabricación del sistema de montaje y de los paneles fotovoltaicos.

## 7.2. Recomendaciones para la Implementación

### 7.2.1. Recomendación de Políticas y Regulaciones

Para avanzar en el desarrollo de la agrivoltaica en las Islas Baleares, son cruciales varias medidas políticas y regulatorias. En primer lugar, se necesita un marco regulatorio sólido que apoye el uso dual de la tierra para la agricultura y la producción de energía fotovoltaica, asegurando que la energía solar no sea penalizada. Este marco debe definir claramente la agrivoltaica, distinguirla de los sistemas solares convencionales y alinearse con los estándares nacionales e internacionales.

Es esencial desarrollar regulaciones específicas para las instalaciones agrivoltaicas que reconozcan sus características distintas en los procesos administrativos. La coordinación entre el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) y el Ministerio de Agricultura es vital para crear un marco que integre la energía solar con las actividades agrícolas. Este marco debe establecer objetivos de capacidad específicos y simplificar los procesos de aprobación de proyectos.

Las regulaciones de uso de la tierra deben respaldar tanto las actividades agrícolas como las fotovoltaicas, considerando las condiciones geográficas y climáticas en la categorización de cultivos. Se debe garantizar la compatibilidad con la Política Agraria Común (PAC) para mantener la elegibilidad para subsidios agrícolas públicos. Además, los proyectos agrivoltaicos deben incluirse en las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), y deben existir iniciativas

para promover una economía circular y desarrollar un sistema de compensación de huella de carbono.

Para las Islas Baleares, se recomiendan ajustes regulatorios específicos: aumentar el límite máximo de altura para instalaciones fotovoltaicas (actualmente 4 metros), revisar los requisitos de compensación para proyectos fotovoltaicos que no reconozcan la agrivoltaica como altamente innovadora, y modificar las leyes que restringen la participación en proyectos a agricultores profesionales seleccionados, excluyendo así a los agricultores emergentes. Además, establecer institutos de investigación en las Baleares dedicados a proyectos agrivoltaicos facilitaría la colaboración entre agricultores, empresas de energía y agencias gubernamentales.

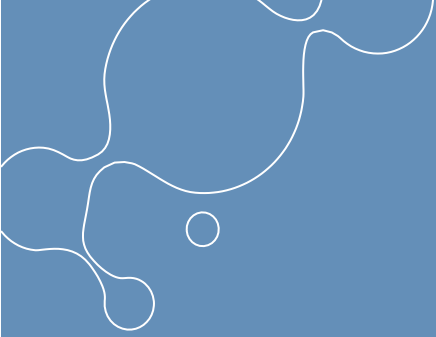
### 7.2.2. Recomendación Tecnológica

Para mejorar la efectividad y sostenibilidad de la agrivoltaica en las Islas Baleares, se deben considerar varias recomendaciones técnicas y operativas. En primer lugar, se deben evaluar a fondo los efectos de sombra en cultivos como las algarrobas para evitar impactos adversos en el rendimiento. Hay una necesidad de herramientas de modelado avanzadas que incorporen datos agronómicos y factores como la acumulación de suciedad, similares a sistemas convencionales como PVSyst o SAM. Los diseños de instalación deben optimizarse para cultivos específicos, teniendo en cuenta las limitaciones de acceso y espacio, como las que se encuentran en las terrazas agrícolas.

Además, las actividades agrícolas deben armonizarse con la operación y el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos. Las soluciones tecnológicas deben abordar los desafíos de inversión y adaptarse a configuraciones específicas, como instalaciones elevadas para cultivos frutales. Evaluar el rendimiento de los cultivos con sistemas fotovoltaicos integrados es crucial para asegurar un impacto negativo mínimo en los rendimientos, al mismo tiempo que se generan beneficios medibles. Promover la investigación, el desarrollo y la innovación a través de financiación pública puede apoyar aún más estos avances. Finalmente, integrar sistemas de seguimiento y almacenamiento en las configuraciones agrivoltaicas facilitará la gestión óptima de la luz y la energía.

Sin embargo, el progreso legislativo se queda atrás en comparación con los avances tecnológicos. Establecer una definición estandarizada para la agrivoltaica es crucial. Esta definición facilitará la creación de legislación, permitirá la categorización de proyectos y asegurará la recopilación sistemática de datos. Tal marco apoyará el intercambio de

información sobre el rendimiento de cultivos y tecnología y promoverá las mejores prácticas. Además, fomentar un diálogo colaborativo entre los sectores agrícola y energético es esencial. Históricamente, estos sectores han estado en desacuerdo, pero un enfoque cooperativo puede equilibrar las necesidades agrícolas con los beneficios técnicos y económicos de la tecnología fotovoltaica. Con un marco apropiado y financiación gubernamental, la agrivoltaica tiene el potencial de convertirse en una tecnología clave en un futuro cercano.



## 8. Conclusiones

---

La agrivoltaica presenta una oportunidad innovadora para que las Islas Baleares mejoren tanto la productividad agrícola como la producción de energía renovable, desempeñando así un papel fundamental en la estrategia de desarrollo sostenible de la región. Esta tecnología innovadora promete aumentar la productividad de la tierra entre un 35% y un 73%, con el potencial de cumplir los objetivos del Plan Nacional de Energía y Clima (PNEC) 2030 cubriendo solo el 0.6% de la Superficie Agrícola Utilizada (SAU) de España.

La integración de la agrivoltaica en los marcos agrícola y energético de las Islas Baleares requiere un entorno regulador de apoyo, definiciones claras, regulaciones diferenciadas y coordinación entre las autoridades ecológicas y agrícolas. Al establecer dicho marco, se puede asegurar la coexistencia armoniosa de actividades agrícolas y fotovoltaicas, maximizando los beneficios de esta tecnología de uso dual.

Los AVS ofrecen numerosos beneficios agrícolas, incluida la creación de microclimas que reducen la temperatura y la evaporación del suelo, un ahorro significativo de agua a través de sistemas de riego mejorados y un aumento en los rendimientos de los cultivos incluso en condiciones climáticas desfavorables. Estos sistemas también pueden apoyar la biodiversidad al incorporar plantas perennes o polinizadoras alrededor de la infraestructura, enriqueciendo así el ecosistema.

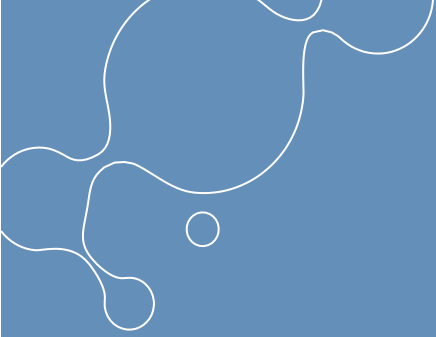
Desde una perspectiva de producción de energía, la agrivoltaica optimiza el uso de la tierra al combinar la producción de alimentos y energía en la misma área. A pesar de requerir ligeramente más tierra que los sistemas convencionales montados en el suelo, la agrivoltaica proporciona beneficios energéticos locales sustanciales, que incluyen la electrificación rural, la reducción de la dependencia de la red y flujos de ingresos diversificados para los agricultores a través de la venta de energía excedente. Además, la sinergia entre la agrivoltaica y la generación de hidrógeno verde presenta una emocionante vía para futuros desarrollos en energía limpia.

Económicamente, la agrivoltaica aumenta los ingresos de los agricultores en más del 30% cuando se seleccionan cultivos compatibles, crea oportunidades laborales en áreas rurales y mejora el bienestar animal al proporcionar entornos sombreados. El potencial de estos sistemas para aumentar la productividad global de la tierra y su alineación con las prácticas de agricultura orgánica destacan su idoneidad para las Islas Baleares.

Los avances globales en agrivoltaica, como los extensos proyectos en Estados Unidos, China y Corea del Sur, subrayan la escalabilidad y efectividad de la tecnología. Las innovaciones tecnológicas, incluida la

creación de módulos fotovoltaicos orgánicos (OPV) y la integración de gemelos digitales y software de modelado, mejoran aún más la eficiencia y viabilidad de los AVS.

En conclusión, con la implementación de políticas adecuadas, innovaciones tecnológicas y la participación activa de la comunidad, la agrivoltaica puede contribuir significativamente a los objetivos de transición ecológica y de energía renovable de las Islas Baleares para 2040. Este enfoque integrado no solo avanza la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la resiliencia económica del sector agrícola de la región.



## 9. Referencias

---

- [1] A. Z. Adolf Goetzberg, "Kartoffeln unter dem Kollektor," *Sonnenenergie*, p. 19 – 22, 1981
- [2] T. S. e. a. B. Valle, "Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 1495-1507, 2017.
- [3] e. a. Max Trommsdorff, "Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, 2021.
- [4] T. R. e. a. S. Asa'a, "A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024.
- [5] L. J. Walston, "Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals," *Frontiers*, vol. 6, 2022.
- [6] Food Insecurity Information Network, "GLOBAL REPORT ON FOOD CRISES," 2023.
- [7] The Economist, "Why fertiliser prices are soaring," *The Economist*, 31 May 2022.
- [8] World Bank, "Food Security Update | World Bank Response to Rising Food Insecurity," 1 July 2024.
- [9] Chatham House, "The emerging global crisis of land use," 2023. [Online]. Available: <https://www.chathamhouse.org/2023/11/emerging-global-crisis-land-use/06-land-crunch>. [Accessed 03 July 2024].
- [10] European Commission, "Renewable energy targets," [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en). [Accessed 3 July 2024].
- [11] Deloitte, "Los Territorios No Peninsulares 100% descarbonizados en 2040: la vanguardia de la transición energética en España," *Monitor Deloitte*, 2024.
- [12] A. E. e. a. Axel Weselek, "Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review," *Agronomy for Sustainable Development*, pp. 39- 35, 2019.
- [13] N. S. e. a. R.K. Chopdar, "Comprehensive review on agrivoltaics with technical, environmental and societal insights," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024.

- [14] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, "Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition: A Guideline for Germany," February 2024. [Online]. [Accessed 03 July 2024].
- [15] M. T. a. T. Iida, "Evolution of agrivoltaic farms in Japan," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2361, no. 030002, 2021.
- [16] Kaila, "Agrivoltaics," [Online]. Available: <https://my.kaila.eu/finder/?type=area&query=Agrivoltaics>. [Accessed 3 July 2024].
- [17] P. Jowett, "SolarPower Europe presents agrisolar digital map," *PV Magazine*, 16 May 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/05/16/solarpower-europe-presents-agrisolar-digital-map/>. [Accessed 1 August 2024].
- [18] M. C. S. A. A. Agostini, "Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment," *Applied Energy*, vol. 281, 2021.
- [19] E. Bellini, "PV Magazine," 26 July 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/07/26/researchers-find-agrivoltaics-have-lcoe-of-0-039-kwh-7-year-payback-time-in-india/>. [Accessed 30 July 2024].
- [20] European Commission, "Clean energy for EU islands," [Online]. Available: <https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/>. [Accessed 22 Julio 2024].
- [21] J. W. C. G. Norgrove, "Agrivoltaics to shade cows in a pasture-based dairy system," in *Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review*, 2022.
- [22] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Energy.gov," [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/agrivoltaics-solar-and-agriculture-co-location>. [Accessed 5 July 2024].
- [23] E. Bellini, "pv magazine - Photovoltaics Markets and Technology," 3 September 2020. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/>. [Accessed 2 August 2024].
- [24] F. J. J. a. Shiva Gorjian, "Technological Advancements and Research Prospects of Innovative Concentrating Agrivoltaics," *Research Gate*, May 2023.
- [25] Hyperfarm, [Online]. Available: <https://hyperfarm.eu/about/pilot-plants/transfarm/>. [Accessed 22 Julio 2024].

- [26] J. F. WEAVER, "New software modeling tool for agrivoltaics," *PV Magazine*, 31 March 2023.
- [27] J. G. Soto, "Endesa.com," 15 February 2024. [Online]. Available: <https://www.endesa.com/en/the-e-face/biodiversity/combining-solar-energy-and-agriculture-challenge-agrivoltaics>. [Accessed 2 August 2024].
- [28] E. BELLINI, "Cost comparison between agrivoltaics and ground-mounted PV," *PV Magazine*, 24 July 2024.
- [29] Fraunhofer ISE, "Dual Yield on Arable Land: Guideline for Agrivoltaics Published," 2021.
- [30] Iberdrola, "Iberdrola España," 23 March 2024. [Online]. Available: <https://www.iberdrolaespana.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/240323-winesolar-de-iberdrola-espana-un-ejemplo-de-agrivoltaica>. [Accessed 2 August 2024].
- [31] A. T. N. J.-W. A. Chatzipanagi, "Overview of the Potential and Challenges of Agri-Photovoltaics in the European Union," *JCR Science for Policy Report*, 2023.
- [32] Next Generation EU, "RESOLUCIÓN DE XX DE XXXXX DE 2024 DEL INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA," [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/es-ES/Participacion/Documents/aei-p%C3%BAblica-orden-por-la-que-se-establecen-las-bases-reguladoras-para-las-convocatorias-de-ayudas-a-proyectos-innovadores-de-energ%C3%ADas-renovables-y-alma>. [Accessed 15 Julio 15].
- [33] Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, "Gencat," [Online]. Available: <https://agricultura.gencat.cat/ca/ambits/alimentacio/estrategia-alimentaria/pla-estrategic/>. [Accessed 2 August 2024].
- [34] INE, "Agricultural Census Year 2020," 2022.
- [35] INE, "Encuesta de Consumos Energéticos Año 2022," 2024.
- [36] Ministerio De Agricultura y Alimentacion, "ESYRCE (Encuesta de Superficies y rendimientos de cultivos)," 2024. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>. [Accessed 16 July 2025].
- [37] IFEMA, "Global Mobility Call," [Online]. Available: <https://www.ifema.es/en/global-mobility-call/sector-news/the-potential-of-solar-energy-in-spain>. [Accessed 15 Julio 2024].

- [38] Agencia Estatal de Meteorología, “AEMET,” [Online]. Available: <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?k=bal>. [Accessed 22 Julio 2024].
- [39] World Bank Group, “Global Solar Atlas,” [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=39.557001,2.081909,9&a=2.343384,39.567131,2.371948,39.495996,2.453247,39.443444,2.541138,39.45701,2.600464,39.524797,2.661987,39.536654,2.712524,39.484133,2.730103,39.404428,2.796021,39.331428,2.901489,39.324633,2.98>. [Accessed 22 Julio 2024].
- [40] Mallorca Airport, [Online]. Available: [https://www.palmaairport.info/2023/08/28/severe-weather-in-mallorca-devastation-caused-by-hurricane-force-gusts-and-heavy-rain/?utm\\_content=cmp-true](https://www.palmaairport.info/2023/08/28/severe-weather-in-mallorca-devastation-caused-by-hurricane-force-gusts-and-heavy-rain/?utm_content=cmp-true). [Accessed 22 Julio 2024].
- [41] F. F. Such, “La agricultura de las Illes Balears: Limitaciones, retos y oportunidades,” Fundación de Estudios Rurales ANUARIO 2023, Palma, 2023.
- [42] A. M. F.-O. e. a. Alvaro Fernandez-Solas, “Potential of agrivoltaics systems into olive groves in the Mediterranean region,” *Applied Energy*, 2023.
- [43] J. Á. P.-M. T. E. Miquel Àngel Martínez-Medina, “Desalination in Spain and the Role of Solar Photovoltaic Energy,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 6, p. 859, 2024.
- [44] GOIB, “Decret [...] /20[...], d [...] d [...], d’aprovació definitiva de la modificació del Pla Director Sectorial Energètic de les Illes Balears,” Palma, 2024.
- [45] Red Eléctrica, “Red Eléctrica,” [Online]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/baleares/baleares5m/acumulada/2024-07-11>. [Accessed 24 Julio 2024].
- [46] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, “Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España,” 2023. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>. [Accessed 2 Agosto 2024].
- [47] European Commission, “Clean energy for EU islands,” [Online]. Available: <https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/news/regional-government-balearic-islands-presents-first-photovoltaic-park-open-local-participation>. [Accessed 24 July 2024].

[48] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, “UNA VISIÓN GLOBAL DE LA AGRICULTURA ESPAÑOLA A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DEL CENSO AGRARIO 2020,” 2023.

[49] OMIE, [Online]. Available: <https://www.omie.es/>. [Accessed 24 Julio 2024].

[50] J. Wolfendale, “Eco Vida Homes,” [Online]. Available: <https://www.ecovidahomes.com/blog/can-you-sell-electricity-back-to-the-grid-in-spain/>. [Accessed 24 July 2024].

[51] MITECO, [Online]. Available: [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional/cuarto\\_inventario.html](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional/cuarto_inventario.html). [Accessed 29 July 2024].

[52] J. M. Sujith Ravi, “Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands,” *Applied Energy*, vol. 165, pp. 383-392, 2016.